

**PROJETO PD 2866-0464-2017 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE, MONITORAMENTO  
E GERENCIAMENTO DA GD POR FONTES INCENTIVADAS**

**RELATÓRIO PRELIMINAR SOBRE APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DA NORMA  
IEEE1459-2010 PARA PADRONIZAÇÃO DE MEDIDAS E FATORES DE POTÊNCIAS.**

**TIPO DE DOCUMENTO: RELATÓRIO REFERENTE ÀS ETAPAS 1 E 2**

- E2 - PESQUISA DO REFERENCIAL TEÓRICO, DO DOMÍNIO E DO PROBLEMA

**RESPONSÁVEL PELO RELATÓRIO:**

GILBERTO LEXINOSKI

UTFPR-Curitiba

[gilberto.2015@alunos.utfpr.edu.br](mailto:gilberto.2015@alunos.utfpr.edu.br)

Fone: 41 3310-4761

**COLABORADORES:**

ANDRÉ EUGENIO LAZARETTI

CLAYTON HILGEMBERG DA COSTA

GUILHERME DAN YAMADA

GUILHERME LUIZ MORITZ

MARCELO PALUDETTO RODRIGUES

**OBJETIVO:**

Apresentar a aplicação da norma IEEE 1459/2010 para monitoramento e gerenciamento do Fluxo de Potência entre o protótipo 3.0 e a rede trifásica, usando a *compactRIO* para gerenciamento do sistema criado.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	4
OBJETIVOS:	4
REQUISITOS DE ESPECIFICAÇÕES PRELIMINARES DO PROTÓTIPO:	4
NORMA REGULAMENTADORA IEEE1459-2010	7
APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DA NORMA IEEE1459-2010:	8
DETALHAMENTO DA VI DESENVOLVIDA EM LABVIEW	27
RESULTADOS OBTIDOS	35
ACOPLAMENTO AO PROTÓTIPO 3.0 COMPACTRIO.	44
CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	44

## **1. INTRODUÇÃO**

O conhecimento do fluxo de potência, assim como os efeitos causados na rede de distribuição elétrica trifásica, são variáveis fundamentais ao monitoramento de micro e miniusinas de geração, o que permite estimar a Qualidade e Quantidade de Energia Elétrica gerada, conduzindo a uma padronização de técnicas e medidas.

Este relatório apresenta os resultados obtidos com a aplicação computacional da norma IEEE1459-2010 (Padronização e Definição às Medidas de Quantidades de Potências Elétricas em sistemas sobre condições Senoidais, não senoidais, balanceados e não balanceados), explicando parâmetros suficientes para monitoramento de sistemas elétricos generalizados, sendo desenvolvido em LabVIEW, devido a compatibilidade com o dispositivo *compactRIO*, da National Instruments, utilizado como centro de gerenciamento.

## **2. OBJETIVOS:**

- Apresentar metodologia utilizada no desenvolvimento computacional da norma IEEE1459-2010 através do LABVIEW.
- Sintetizar seus pontos mais importantes direcionados aos Requisitos do protótipo de Monitoramento e Gerenciamento de Usinas Fotovoltaicas.
- Demonstrar e esclarecer parâmetros utilizados aos valores atingidos.
- Validar resultados.

## **3. REQUISITOS DE ESPECIFICAÇÕES PRELIMINARES DO PROTÓTIPO:**

Dentre os Requisitos Funcionais e Não Funcionais do protótipo, abaixo serão descritos os que se atribuem a esta análise:

### **3.1 Requisitos de Monitoramento de Status do Inversor:**

**RF002.003:** O sistema deverá monitorar o valor da tensão AC de saída do inversor nas Fases A e B.

**RF002.004:** O sistema deverá monitorar o valor da corrente AC de saída do inversor nas Fases A e B.

### **3.2 Requisitos de Calibração e Processamento de Sinais:**

**RF004.004:** O período base de integralização para cada sinal calibrado deve ser múltiplo de 25 ms, pois esta é a taxa máxima de amostragem viáveis para o sistema de hardware sendo utilizado.

**RF004.005:** Estando no Modo de Operação MO01 (normal), o sistema deve definir o período de integralização efetivo como sendo igual ao período base de integralização definido em **RF004.004**.

**RF004.006:** Estando no Modo de Operação MO02(alarme), o sistema deve definir o período de integralização efetivo como sendo um quarto do definido período base de integralização definido em **RF004.004**.

**RF004.013:** O sistema deve calcular, para cada sinal calibrado, um sinal cujo período de amostragem é o período de integralização efetivo definido por **RF004.005** e **RF004.006** e cujo conteúdo por amostra é a média da Taxa de Distorção Harmônica Total a cada período de integralização efetivo definido por **RF004.005** e **RF004.006**. Este sinal será denominado taxa de distorção harmônica média integralizada.

**RF004.020** - O sistema deve prover uma maneira de configurar até 8 pares de sinais calibrados para serem considerados pares de tensão e corrente registradas em um ponto comum do sistema.

**RF004.021** - O sistema deve calcular um sinal de potência instantânea a partir de cada um dos pares de tensão e corrente configurados por **RF004.020**.

**RF004.022** - O sistema deve prover uma maneira para configurar um período de integralização base para cada sinal de potência instantânea.

**RF004.023** - Estando no Modo de Operação MO01 (normal), o sistema deve definir, para cada sinal de potência instantânea, um período de integralização efetivo que é igual ao período de integralização base definido em **RF004.022**.

**RF004.024** - Estando no Modo de Operação MO02 (alarme), o sistema deve definir, para cada sinal

de potência instantânea, um período de integralização efetivo que é igual a um quarto do período de integralização base definido em **RF004.022**.

**RF004.025** - O sistema deve calcular, para cada sinal de potência instantânea, um sinal cujo período de amostragem é o período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023** e cujo conteúdo por amostra é a média do sinal potência (potência ativa) a cada período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023**. Este sinal será denominado sinal de potência ativa integralizada neste documento.

**RF004.026** - O sistema deve calcular, para cada sinal de potência instantânea, um sinal cujo período de amostragem é o período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023** e cujo conteúdo por amostra é a potência aparente no período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023**. Este sinal será denominado sinal de potência aparente integralizada neste documento.

**RF004.027** - O sistema deve calcular, para cada sinal de potência instantânea, um sinal cujo período é o período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023** e cujo conteúdo por amostra é potência reativa média no período de integralização efetivo definido por **RF004.022** e **RF004.023**. Este sinal será denominado sinal de potência reativa integralizada neste documento.

### **3.3 Requisitos de Interface com Usuário:**

**RF006.001:** O sistema deverá apresentar ao usuário uma tela com as seguintes informações de monitoramento em tempo real:

- tensão, corrente e potência (ativa e reativa) na saída do inversor para a Fase A (obtidos conforme Requisitos RF002.003, RF002.004, RF004.025 e RF004.027).
- tensão, corrente e potência (ativa e reativa) na saída do inversor para a Fase B (obtidos conforme Requisitos RF002.003, RF002.004, RF004.025 e RF004.027).
- fator de potência por Fase e média das fases (conforme Requisito RF002.002) somatório da potência das fases (conforme Requisitos RF004.025 e RF004.027)

#### **4. NORMA REGULAMENTADORA IEEE1459-2010**

As padronizações do IEEE são documentos desenvolvidos com Sociedades do IEEE, Comitês de Coordenação de Padronização e a Associação de Padronização do IEEE (IEEE-SA). Os desenvolvimentos do IEEE trazem processos de consensos aprovados pelo Instituto de Padronização Nacional Americano, que avalia diferentes pontos de vista dos interessados para chegar a um produto final viável a todos.

Tendo em vista que as definições de potências ativa, reativa e aparente atualmente usadas são baseadas a conhecimentos desenvolvidos durante a década de 1940, tais conceitos serviram bem a indústria desde que as formas de ondas de tensão e corrente permaneçam próximas a senoidais.

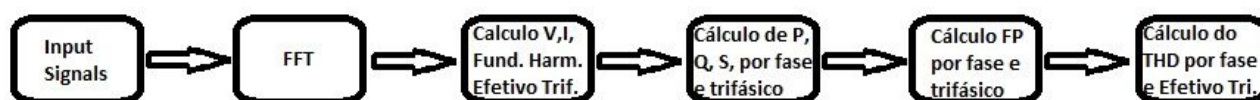
No entanto, nos últimos 50 anos houve importantes mudanças tecnológicas que por um lado permitiram grandes melhorias para estimativas mais precisas, entretanto, também encontramos maiores perturbações para o sistema elétrico. O novo ambiente é condicionado pelos seguintes fatos:

- a) Equipamentos eletrônicos de potência, tais cargas tem potencial de criar pontos de distúrbios pelos usuários finais dos equipamentos.
- b) Novas definições de potências tem sido discutida nos últimos 30 anos na literatura da engenharia (Filipski and Labaj [B9]). O mecanismo de energia elétrica segue fluxo por condições não senoidais e/ou desbalanceadas.
- c) Os tradicionais instrumentos designados para formas de ondas senoidais de 50/60 Hz provém significantes erros quando as formas de ondas da tensão e corrente são distorcidas (Filipski and Labaj [B9]).
- d) Microprocessadores e Microcontroladores permitem a construção de instrumentos elétricos com melhores precisão capazes de medir quantidades elétricas para avançados modelos matemáticos.
- e) Existe a necessidade de quantificar corretamente as distorções causadas pelas cargas não lineares e para aplicar justa distribuição de custos para que se possa manter a qualidade do serviço elétrico.

## 5. APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DA NORMA IEEE1459-2010:

Sistemas reais são, no geral, desbalanceados e possuem características não lineares, logo este desenvolvimento considera os tópicos e equações mais importantes disponíveis na Norma IEEE1459-2010 direcionados a este objetivo.

Como serão demonstradas, as equações definidas na Norma IEEE1459-2010, referente às componentes harmônicas direcionadas aos objetivos do estudo, fazem menções aos sinais de tensão e de corrente no domínio da frequência, então, para simplificar o desenvolvimento computacional, primeiramente se aplica a Transformada de Fourier em todos os sinais de entrada, para então se aplicar as definições da Norma. Abaixo a figura 1 apresenta o fluxograma simplificado da programação elaborada em LABVIEW:



**Figura 1: Fluxograma simplificado desenvolvido em LABVIEW.**

1. Aquisição dos sinais de Tensão e Corrente por fase;
2. Aplicação da Transformada de Fourier, análise domínio frequência;
3. Definição de Tensões e Correntes Fundamentais e harmônicas por fase e efetiva;
4. Cálculo de Potências Ativas, Reativas, Aparente por fase e efetiva trifásica;
5. Cálculo dos Fatores de Potência por fase, Vetorial, Aritmético e Efetivo trifásico;
6. Cálculo das THD's das Tensões e Correntes por fase e efetivas trifásica.

Adiante serão apresentadas as fundamentações teóricas utilizadas em cada um dos blocos mencionados acima:

### 5.1 Aquisição dos sinais de Tensão e Corrente por fase:

A Norma Regulamentadora IEEE1459-2010, além de atender os requisitos propostos,



também quantifica, por exemplo, os efeitos de uma carga qualquer sobre a rede Trifásica do Sistema Interligado Nacional (SIN), mas para isso requer conhecimentos das variáveis de todas as fases. A programação desenvolvida possui as seguintes variáveis de entrada:

- Medidas das tensões instantâneas:  $v_a$  (fase A),  $v_b$  (fase B),  $v_c$  (fase C) e  $v_n$  (neutro).
- Medidas das Correntes instantâneas:  $i_a$  (fase A),  $i_b$  (fase B),  $i_c$  (fase C).
- Corrente de Neutro:  $i_n = -(i_a + i_b + i_c)$ , sendo  $i_n = 0$  para sistemas de 3 linhas.
- Frequência Fundamental da rede  $f_1 = 60$  Hz.
- Frequência de Amostragem do sinal  $F_s = 25$  kHz.
- Número de Ciclos fundamentais ( $k$ ) para integração.

O número de Ciclos Fundamentais  $k$  de integralização esta relacionado ao período de integralização, diante os requisitos **RF004.005** e **RF004.006** para frequência fundamental da rede elétrica  $f_1 = 60$  Hz, se tem  $k = 60$  ciclos para Modo de Operação MO01 (normal) e  $k = 15$  ciclos para Modo de Operação MO02 (alarme).

## **5.2 Aplicação da Transformada de Fourier, análise domínio frequência:**

Ao aplicar a Função Transformada de Fourier (fft) sobre as amostras dos sinais em regime do tempo, através das ferramentas de desenvolvimento utilizadas como MATLAB e LABVIEW, é muito importante que seja compreendida sua forma de processamento do sinal:

### **5.2.1 Efeitos do número de ciclos $k$ de integração:**

Primeiramente, para amostras de entrada a partir de uma aquisição realizada durante um número de  $k$  ciclos, a Função (fft) toma como frequência fundamental na saída, aquela correspondente ao período de amostragem na entrada, ou seja, se a entrada é composta por amostras de um sinal de  $f = 60$  Hz, realizadas durante  $k = 60$  ciclos corresponde ao período  $T = 1$  s no regime do tempo, então, a (fft) retorna como frequência fundamental  $f_1 = 1$  Hz.

De acordo com o teorema de Fourier, qualquer função periódica prática de frequência  $w_1$  pode ser expressa na forma de uma soma infinita de funções seno ou cosseno que são múltiplos inteiros de  $w_1$ . Portanto,  $F(w)$  pode ser expressa como: (Sadiku K., pg 685)

$$F(w) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot w_1 \cdot t) + b_n \cdot (n \cdot w_1 \cdot t)] \quad (\text{Sadiku K. - Eq. 17.3 – pg 685})$$

Onde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt \quad (\text{Sadiku K. - Eq. 17.6 – pg 685})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos(n \cdot w_1 \cdot t) dt \quad (\text{Sadiku K. - Eq. 17.8 – pg 685})$$

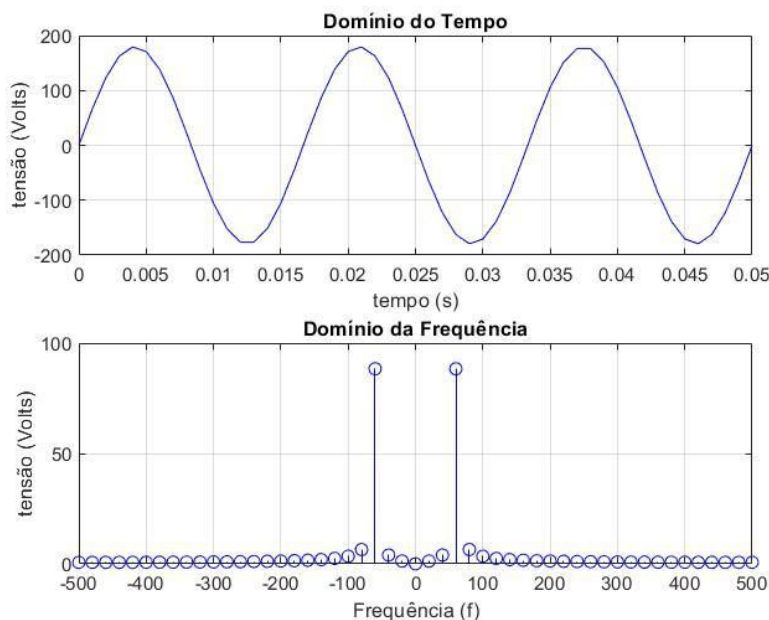
$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(n \cdot w_1 \cdot t) dt \quad (\text{Sadiku K. - Eq. 17.9 – pg 685})$$

Assim sendo, as magnitudes das componentes fundamentais da rede elétrica  $f=60\text{Hz}$  é alocada na posição de  $n=60$  dos vetores  $V_w$  e  $I_w$  na saída da (fft), considerando que a componente DC que é alocada na posição  $n=0$ . Desta forma podemos interpretar as saídas como indicação das magnitudes de subharmônicas e interharmônicas mensuradas a cada 1Hz, visto que a (fft) foi parametrizada para um período de integralização de  $T=1\text{s}$  ou  $k=60$  ciclos.

### 5.2.2 Normalização das componentes no domínio da frequência:

Seguindo adiante, precisa-se realizar a normalização de forma adequada. Ao aplicar a (fft) em qualquer vetor contendo amostras de um sinal no regime do tempo, o mesmo será distribuído em função da frequência tanto no eixo negativo como positivo, ocorrendo uma divisão das magnitudes para frequências diferentes de zero. A seguir a figura 1 mostra os gráficos de um exemplo da distribuição de um sinal característico de tensão no domínio do tempo e frequência:

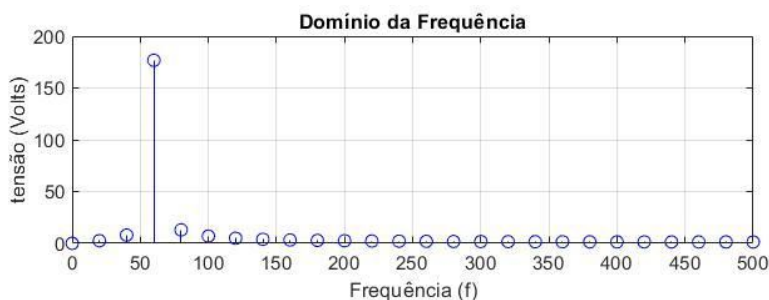
$$v(t) = \sqrt{2} \cdot 127 \cdot \sin(2\pi \cdot 60 \cdot t)$$



**Figura 2: Gráficos de um sinal característico no domínio do tempo e da frequência.**

Para montagem dos gráficos acima, foram necessários alguns ajustes, principalmente quanto à alocação dos valores no vetor de saída da (fft). Importante ressaltar que na componente de frequência zero (componente DC) não ocorre divisão da magnitude.

Portanto, uma forma de simplificar o processo, é considerar somente a primeira metade do vetor de saída que contém desde a componente de frequência zero até a última componente de frequência e positiva que pode ser recuperada, de modo que todas as componentes diferentes de zero, devem ser multiplicadas por dois. A figura 2 mostra um gráfico que expressa magnitudes em função das frequências zero e positivas, considerando somente a primeira metade do vetor de saída da (fft), onde foi realizada a correta normalização de todas as componentes:



**Figura 3: Gráfico da magnitude com modulação adequada em função da frequência.**

Neste exemplo, aplicou-se a (fft) sobre amostras adquiridas durante três ciclos do sinal no domínio do tempo (conforme Figura 1), assim o intervalo de frequência de saída da (fft) respeitou o período de integração para três ciclos deste sinal de 60Hz, conduzindo a um intervalo de frequência de saída  $\Delta f=20\text{Hz}$  (conforme Figura 2).

Neste exemplo se evidencia a maior componente em frequência de 500Hz, isto ocorre devido a frequência de amostragem utilizada de 1000Hz. Este fundamento será apresentado a seguir, entretanto, os próximos cálculos consideram valores referentes ao protótipo em desenvolvimento.

### 5.2.3 Componentes Harmônicas contidas no vetor de saída:

Para um sinal limitado em faixa, sem nenhuma componente em frequência superior a  $W$  hertz, pode ser completamente recuperado a partir de suas amostras extraídas a uma frequência pelo menos duas vezes maior que  $2W$  amostras por segundo. (Sadiku K., pg 760)

$$\frac{1}{T_s} = F_s \geq 2W \quad (\text{Sadiku K. - Eq. 18.73 – pg 760})$$

A frequência de amostragem  $F_s=2W$  é conhecida como taxa ou frequência de Nyquist e  $1/F_s$  é o intervalo de Nyquist. (Sadiku K., pg 760)

Como, no protótipo em desenvolvimento se adotou a Frequência de Amostragem  $F_s=25\text{ kHz}$ , aplicando o Teorema de Nyquist, tem-se:

$$W = \frac{F_s}{2} = 12500\text{Hz}$$

Sendo a frequência fundamental da rede é  $f_1 = 60\text{ Hz}$ , então:

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{W}{f_1} = \frac{12500}{60} = 208,333$$

Logo, com os parâmetros utilizados no protótipo, será possível recuperar completamente o sinal até sua 208ª ordem de componente Harmônica.

## 5.2.4 Notações sobre Função Transformada de Fourier (fft)

De forma resumida tem-se as seguintes notações:

**NOTA1:** O número de ciclos  $k$  considerados no vetor de amostras na entrada da (fft), tem efeito diretamente no intervalo de frequência, correspondente aos diferentes valores de magnitude do vetor de saída da (fft).

**NOTA2:** Podemos considerar somente a primeira metade do vetor de saída da (fft), que contém as componentes de frequência zero e positivas, para isso devemos aplicar a devida normalização aos valores.

**NOTA3:** A Frequência de amostragem tem efeito diretamente na capacidade de recuperar um sinal com harmônicas de maiores ordens, adotando como frequência fundamental aquela correspondente ao período contido no vetor de entrada.

## 5.3 Definição de Tensões e Correntes Fundamentais e harmônicas por fase e efetiva

Após aplicação da função (fft) em todos os sinais de tensões e correntes, conforme descrito anteriormente, se tem para cada sinal um vetor com valores correspondentes às magnitudes desde a frequência zero até a componente de frequência positiva de maior ordem, sendo estes valores de domínio da frequência.

A seguir será apresentada a forma mais direta a se atingir os objetivos propostos neste trabalho, assim ocorrerá aplicações simultâneas de definições para sistemas monofásicos e trifásicos, estas definições serão referenciadas aos diferentes índices da Norma Regulamentadora IEEE1459-2010.

### 5.3.1 Definição das Tensões e Correntes Totais, Fundamentais e Harmônicas por fase:

#### 5.3.1.1 Definição das Tensões e Correntes Totais por fase:

Uma vez definido os vetores  $V_w$  e  $I_w$  por fase, podemos calcular os valores eficazes totais das tensões e das correntes conforme item 3.1.2 da Norma IEEE 1459-2010, referente a fase singular não senoidal, da seguinte maneira:

#### 5.3.1.1.1 Definição das Tensões Totais por fase:

$$\begin{aligned}
 V_a &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} v_a(t)^2 dt} = \sqrt{V_{a1}^2 + V_{aH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} V_{aw}^2} \text{ (IEEE1459-2010 – 3.1.2 – p. 7)} \\
 V_b &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} v_b(t)^2 dt} = \sqrt{V_{b1}^2 + V_{bH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} V_{bw}^2} \\
 V_c &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} v_c(t)^2 dt} = \sqrt{V_{c1}^2 + V_{cH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} V_{cw}^2}
 \end{aligned}$$

#### 5.3.1.1.2 Definição das Correntes Totais por fase:

$$\begin{aligned}
 I_a &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} i_a(t)^2 dt} = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{aH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} I_{aw}^2} \text{ (IEEE1459-2010 – 3.1.2 – pg 7)} \\
 I_b &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} i_b(t)^2 dt} = \sqrt{I_{b1}^2 + I_{bH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} I_{bw}^2} \\
 I_c &= \sqrt{\frac{1}{k \cdot T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} i_c(t)^2 dt} = \sqrt{I_{c1}^2 + I_{cH}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{Hmax} I_{cw}^2}
 \end{aligned}$$

#### 5.3.1.2 Definição das Tensões e Correntes Fundamentais por fase:

Para aquisição das componentes fundamentais por fase, conforme já explicado, estes valores estarão alocados nos vetores  $V_w$  e  $I_w$  de saída da (fft), na posição “k” correspondente ao número de ciclos da integração, sendo que a posição zero corresponde a componente de frequência zero e as posições de zero a  $n < k$  correspondem a subharmônicos. Assim podemos coletar as componentes fundamentais das tensões e correntes da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{aw}(k) ; & I_{a1} &= I_{aw}(k) & ; \text{ para fase A} \\ V_{b1} &= V_{bw}(k) ; & I_{b1} &= I_{bw}(k) & ; \text{ para fase B} \\ V_{c1} &= V_{cw}(k) ; & I_{c1} &= I_{cw}(k) & ; \text{ para fase C} \end{aligned}$$

### 5.3.1.3 Definição das Tensões e Correntes das componentes harmônicas:

Partindo do pressuposto que já conhecemos a magnitude das tensões e correntes totais, das tensões e correntes da componente fundamental e que nesta análise não será necessário mensurar as componentes harmônicas separadamente, ainda aplicando a definição 3.1.2 da Norma IEEE1459-2010, temos as seguintes equações:

#### 5.3.1.3.1 Magnitude das componentes harmônicas das Tensões por fase:

$$\begin{aligned} V_{aH} &= \sqrt{V_{a0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} V_{ah}^2} = \sqrt{V_a^2 - V_{a1}^2} \quad (\text{IEEE1459-2010 – item 3.1.2 – pg 7}) \\ V_{bH} &= \sqrt{V_{b0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} V_{bh}^2} = \sqrt{V_b^2 - V_{b1}^2} \\ V_{cH} &= \sqrt{V_{c0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} V_{ch}^2} = \sqrt{V_c^2 - V_{c1}^2} \end{aligned}$$

#### 5.3.1.3.2 Magnitude das componentes harmônicas das Correntes por fase:

$$\begin{aligned} I_{aH} &= \sqrt{I_{a0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} I_{ah}^2} = \sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2} & (\text{IEEE1459-2010 – item 3.1.2 – pg 7}) \\ I_{bH} &= \sqrt{I_{b0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} I_{bh}^2} = \sqrt{I_b^2 - I_{b1}^2} \\ I_{cH} &= \sqrt{I_{c0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} I_{ch}^2} = \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} \end{aligned}$$

### 5.3.2 Definição das Tensões e Correntes Totais, Fundamentais e Harmônicas Efetivas

## Trifásicas:

### 5.3.2.1 Definição das Tensões e Correntes Totais Efetivas Trifásicas:

Este conceito assume um circuito balanceado virtual que causa exatamente as mesmas perdas por efeito Joule nas linhas que o circuito desbalanceado real.

Esta equivalência conduz à definição de uma Corrente efetiva de linha ( $I_e$ ) e de uma Tensão efetiva de linha ( $V_e$ ).

#### 5.3.2.1.1 Definição da Corrente Total Efetiva Trifásica:

Para um sistema de quatro linhas, o balanço de perda de potência nas linhas é expressada da seguinte maneira:

$$r \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho \cdot I_n^2) = 3 \cdot r \cdot I_e^2 \quad (\text{IEEE1459-2010 – item 3.2.2.8 – pg 22})$$

Onde:  $r$  – Resistência da linha

$r_n$  – Resistência da linha do Neutro ;  $\rho = \frac{r_n}{r}$

$I_n$  - Corrente RMS do Neutro

A partir da equação anterior, a corrente equivalente ou efetiva ( $I_e$ ) para um sistema de quatro linhas é obtida como segue:

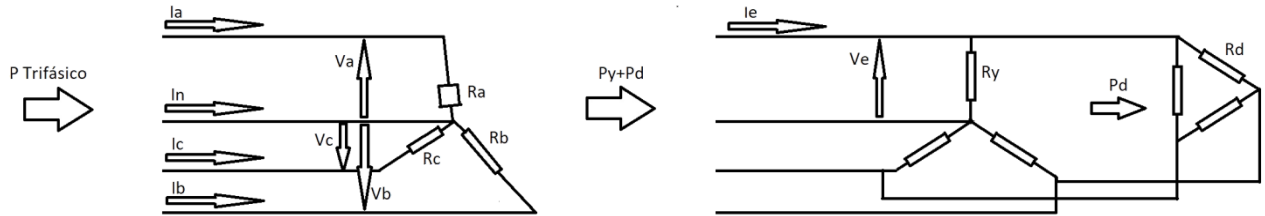
$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2}{3}} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2 + (1 + 3\rho)(I^0)^2} \quad (\text{IEEE1459-2010 – item 3.2.2.8 – pg 22})$$

Nos casos em que a razão  $\rho$  não é conhecida, é recomendável adotar  $\rho = 1$  sem que traga quaisquer desvantagens aos cálculos.

#### 5.3.2.1.2 Definição da Tensão Total Efetiva Trifásica:



Para obtenção da tensão equivalente ou efetiva ( $V_e$ ) se assume a existência de dois sistemas virtuais balanceados:



**Figura 4: Representação do sistema equivalente equilibrado e mesmas perdas na linha.**

- I. Primeiro um sistema de quatro linhas composto de três resistências equivalentes  $R_Y$  conectadas em Y dissipando a potência ativa  $P_Y$ .
- II. E o segundo sistema de três linhas composto por três resistências equivalentes  $R_\Delta$  conectadas em  $\Delta$ , dissipando o restante da potência ativa equivalente  $P_\Delta$ .

As potências equivalente entre o sistema atual e o sistema virtual adotado são expressadas da seguinte maneira:

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_\Delta} = 3 \frac{V_e^2}{R_Y} + \frac{9V_e^2}{R_\Delta} \quad (\text{IEEE1459-2010 – item 3.2.2.8 – pg 23})$$

Onde:  $V_e$  – Tensão Efetiva entre Linha e Neutro

A partir da equação anterior, a tensão equivalente para um sistema de quatro linhas é obtida como segue:

Com a notação:  $\xi = \frac{P_\Delta}{P_Y} = \frac{9V_e^2 R_Y}{R_\Delta 3V_e^2} = \frac{3R_Y}{R_\Delta}$

Resulta:  $V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + \xi(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9(1+\xi)}} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + \frac{(V^0)^2}{1+\xi}}$

Por fim, adota-se  $\xi = 1$  sem que traga desvantagens aos resultados, conduzindo à seguinte equação:

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + \frac{(V^0)^2}{2}}$$

(IEEE1459-2010 – item 3.2.2.8 – pg 23)

### 5.3.2.2 Definição das Tensões e Correntes Fundamentais e Harmônicas Efetivas Trifásicas:

A partir das equações até então referenciadas e considerando que já conhecemos as tensões e correntes fundamentais e harmônicas por fase conforme item 5.3.1.2 e 5.3.1.3, consecutivamente, o cálculo da Tensão e Corrente Efetiva fundamental e harmônica trifásica consiste apenas na aplicação das equações desenvolvidas no item anterior.

#### 5.3.2.2.1 Cálculo das Correntes Fundamental e Harmônica Efetiva Trifásica:

Trabalhando as equações estabelecidas, chega-se as seguintes equações referente às componentes fundamentais e harmônicas separadamente: (IEEE1459 - item 3.2.3.1 - pg 26)

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad ; \text{Corrente Efetiva Total}$$

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad ; \text{Resultante da corrente efetiva total.}$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad ; \text{Corrente Efetiva Fundamental separadamente.}$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad ; \text{Corrente Efetiva Harmônica separadamente.}$$

#### 5.3.2.2.2 Cálculo das Tensões Fundamental e Harmônica Efetiva Trifásica:

Mesmo procedimento para Tensão abaixo: (IEEE1459 - item 3.2.3.1 - pg 27)

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}} \quad ; \text{Tensão Efetiva Total}$$

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad ; \text{Resultante da Tensão total.}$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{18}}; \text{Tensão Efetiva Fundamental separadamente}$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{18}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}$$

Tensão Efetiva Harmônica separadamente

**NOTA:** Em todos os casos se tratam das tensões efetivas entre Linha e Neutro.

## 5.4 Cálculo de Potências Ativas, Reativas, Aparente por fase e efetiva trifásica

Abaixo serão apresentadas as principais equações referentes ao estudo do fluxo de potência, a partir das variáveis já desenvolvidas. Como na Norma IEEE1459-2010 se tem definições das potências por fase e das potências trifásicas mensuradas em itens diferentes, alguns conceitos que serão abordados a seguir poderá se referenciar a itens antecessores aos já mencionados da Norma.

### 5.4.1 Cálculo de Potências Ativas, Reativas e Aparente por fase:

A seguir segue os conceitos definidos na norma para cálculo de todas as potências e como foram aplicados a partir dos resultados obtidos até aqui.

#### 5.4.1.1 Cálculo de Potências Ativas por fase:

A Norma traz a seguinte definição de potência ativa:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t) i(t) dt \quad (\text{IEEE1459 - item 3.1.2.3 - pg 9})$$

$$P = P_1 + P_H$$

Onde:

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1(t) i_1(t) dt = V_1 I_1 \cos(\Theta_1) \quad \text{Potência Ativa Fundamental}$$

(IEEE1459 - item 3.1.2.4 - pg 9)

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\Theta_h) = P - P_1 \quad \text{Potência Ativa Harmônica (ou Não Fundamental)}$$

(IEEE1459 - item 3.1.2.5 - pg 9)

A Função Transformada de Fourier tem como saída para cada uma das fases os vetores  $V_w$  e  $I_w$ , que são compostos de variáveis complexas que representam a magnitude e fase de para cada uma das componentes recuperadas, conforme definido no item 5.2 deste relatório.

Assim, no domínio da frequência, uma forma direta de se obter o valor da potência ativa total por fase é através do somatório das partes reais de cada uma das componentes resultantes da multiplicação termo a termo destes vetores, já que compreendem as mesmas ordens:

$$\begin{aligned} P_a &= P_{a1} + P_{aH} = \sum_{n=0}^{n=hmax} \text{real}(V_{aw}(n) \cdot I_{aw}(n)^*) \\ P_b &= P_{b1} + P_{bH} = \sum_{n=0}^{n=hmax} \text{real}(V_{bw}(n) \cdot I_{bw}(n)^*) \\ P_c &= P_{c1} + P_{cH} = \sum_{n=0}^{n=hmax} \text{real}(V_{cw}(n) \cdot I_{cw}(n)^*) \end{aligned}$$

#### 5.4.1.2 Cálculo de Potências Reativas por fase:

A Norma traz a definição conceituação de potência reativa da seguinte maneira:

$$Q_1 = \frac{w}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1(t) \left[ \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1(t) dt \right] dt = V_1 I_1 \sin(\Theta_1) \quad \text{Potência Reativa Fundamental}$$

(IEEE1459 - item 3.1.2.6 - pg 10)

Os termos de potência reativas estão incluídos na Norma traz a definição conceituação de

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad \text{Potência de Distorção Harmônica} \quad (\text{IEEE1459 - 3.1.2.13 - pg 11})$$

No domínio da frequência, a potência reativa total por fase pode ser obtida através do somatório das partes imaginárias de cada uma das componentes resultantes da multiplicação termo a termo entre o vetor  $V_w$  com o conjugado complexo do vetor  $I_w$ . Também podemos desconsiderar a componente DC ( $n=0$ ), já que não possui efeito reativo:

$$\begin{aligned} Q_a &= Q_{a1} + Q_{aH} = \sum_{n=1}^{n=hmax} \text{imag}(V_{aw}(n) \cdot I_{aw}(n)^*) \\ Q_b &= Q_{b1} + Q_{bH} = \sum_{n=1}^{n=hmax} \text{imag}(V_{bw}(n) \cdot I_{bw}(n)^*) \\ Q_c &= Q_{c1} + Q_{cH} = \sum_{n=1}^{n=hmax} \text{imag}(V_{cw}(n) \cdot I_{cw}(n)^*) \end{aligned}$$

#### 5.4.1.3 Cálculo de Potências Aparente por fase:

A definição da potência aparente pela Norma IEEE1459-2010 é como segue:

$$S = VI \quad \text{Potência Aparente} \quad (\text{IEEE1459 – item 3.1.2.7 - pg 10})$$

Aplicando para todas as componentes harmônicas:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1 I_1)^2 + (V_H I_H)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 = S_1^2 + S_N^2$$

Onde:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = V_1 I_1 \quad \text{Potência aparente Fundamental (IEEE1459 – 3.1.2.8 - pg 11)}$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad \text{Potência Aparente não Fundamental (IEEE1459 - 3.1.2.9 - pg 11)}$$

$$S_N = \sqrt{S_H^2 + D_I^2 + D_V^2}$$

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad \text{Potência de distorção da Corrente (IEEE1459 - 3.1.2.10 - pg 11)}$$

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \text{ Potência de distorção da Tensão (IEEE1459 - 3.1.2.11 - pg 11)}$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} = V_H I_H \text{ Potência aparente Harmônica (IEEE1459 - 3.1.2.12 - pg 11)}$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2}$$

Como se tem calculado os valores de V e I de todas as fases conforme visto em **5.3.1.1** podemos calcular as potências aparente por fase da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} S_a &= V_a I_a & \text{Potência Aparente} & \quad (\text{IEEE1459 - item 3.1.2.7 - pg 10}) \\ S_b &= V_b I_b \\ S_c &= V_c I_c \end{aligned}$$

#### **5.4.2 Cálculo de Potências Ativa, Reativa e Aparente Efetiva Trifásicas:**

Com base nos dados já definidos, os cálculos direcionados aos objetivos do estudo de forma computacional são como segue:

##### **5.4.2.1 Cálculo da Potência Ativa Total Trifásica:**

Para o sistema trifásico Norma traz a definição potência ativa:

$$P = P_a + P_b + P_c \text{ Potência Ativa} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.2.2.2 - pg 16})$$

##### **5.4.2.2 Cálculo da Potência Reativa Total Trifásica:**

Para o sistema trifásico Norma traz a definição potência ativa:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \text{ Potência Reativa} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.2.2.3 - pg 17})$$

##### **5.4.2.3 Cálculo da Potência Aparente Trifásica:**

A Norma IEEE1459-2010 nos traz três definições de Potências Aparentes, que na sequência serão utilizados para definição de seus referentes fatores de potências, são elas:

1. Potência Aparente Aritmética
2. Potência Aparente Vetorial
3. Potência Aparente Efetiva:

#### **5.4.2.3.1 Cálculo da Potência Aparente Aritmética Trifásica:**

A potência aparente aritmética é definida com a simples soma entre as potências aparentes de cada fase, como segue abaixo:

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad \text{Potência Aparente Aritmética (IEEE1459 – 3.2.2.5 - pg 18)}$$

#### **5.4.2.3.2 Cálculo da Potência Aparente Vetorial Trifásica:**

Este é o conceito mais adotado ao estudo de Potência Aparente Trifásica. Partindo dos resultados já definidos até então, a Potência Aparente Vetorial é calculada da seguinte maneira:

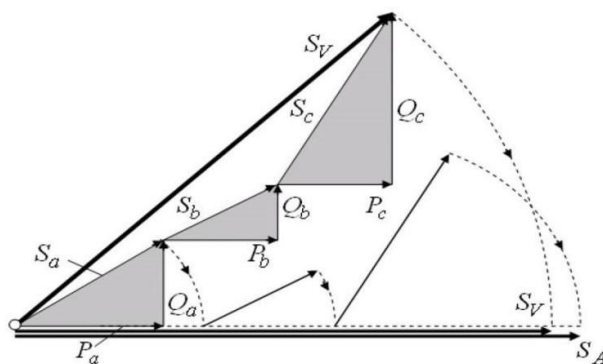
$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Potência Aparente Aritmética (IEEE1459 – 3.2.2.6 - pg 19)}$$

Onde:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad \text{Potência Ativa Total Trifásica} \quad (\text{Item 5.4.2.1})$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad \text{Potência Reativa Total Trifásica} \quad (\text{Item 5.4.2.2})$$

A Norma traz a seguinte representação através dos triângulos de potências de cada fase, que ilustram as diferenças entre as potências aparente aritmética e vetorial:



**Figura 5: Representação das Potências Aparentes Aritmética e Vetorial.**

#### 5.4.2.3.3 Cálculo da Potência Aparente Efetiva Trifásica:

Por fim, tem-se a definição segundo (IEEE1459 – 3.2.3.1 - pg 39):

$$S_e = 3V_e I_e \quad \text{Potência Aparente Efetiva}$$

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad \text{Potência Aparente Efetiva Fundamental}$$

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{eI}^2 - D_{eV}^2 - S_{eH}^2} \quad \text{Potência Aparente Efetiva Não Fundamental}$$

Onde:  $V_e$  – Tensão Efetiva entre fase e neutro (**5.3.2.2.2** deste relatório)

$I_e$  – Corrente Efetiva entre de linha (item **5.3.2.2.1** deste relatório)

Sempre se tem:  $SV \leq SA \leq Se$  (IEEE1459 – 3.2.2.8 – NOTE 3 - pg 24)

### 5.5 Cálculo dos Fatores de Potência por fase, Vetorial, Aritmético e Efetivo trifásico;

#### 5.5.1 Cálculo dos Fatores de Potência por Fase:

A Partir dos dados até então desenvolvidos, podemos calcular o Fator de Potência por fase da seguinte maneira:

$$FP_a = \frac{P_a}{S_a} \quad ; \quad FP_b = \frac{P_b}{S_b} \quad ; \quad FP_c = \frac{P_c}{S_c} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.1.2.16 - pg 12})$$



### 5.5.2 Cálculo dos Fatores de Potência Trifásico:

Assim como temos a definição de Potência Aparente Trifásica Aritmética, Vetorial e Efetiva conforme item **5.4.2.3**, também teremos para cada uma delas a definição de um fator de Potência:

#### 5.5.2.1 Cálculo dos Fator de Potência Vetorial:

$$FP_V = \frac{P}{S_V} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.2.2.7 - pg 19})$$

#### 5.5.2.2 Cálculo dos Fator de Potência Aritmético:

$$FP_A = \frac{P}{S_A} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.2.2.7 - pg 20})$$

#### 5.5.2.3 Cálculo dos Fator de Potência Efetivo:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (\text{IEEE1459 - item 3.2.2.8 - pg 24})$$

Onde, para os itens acima 5.5.2.1, 5.5.2.2 e 5.5.2.3 temos:

$P = P_a + P_b + P_c$	- Potência Total Trifásica (item <b>5.4.2.1</b> deste relatório)
$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2}$	- Potência Aparente Vetorial (item <b>5.4.2.3.2</b> deste relatório)
$S_A = S_a + S_b + S_c$	- Potência Aparente Aritmética ( <b>5.4.2.3.1</b> deste relatório)

Como vimos em **5.4.2.3.3**, sempre se tem:  $SV \leq SA \leq Se$

Então, se conduz pela mesma a definição:  $PFe \leq PFA \leq PFV$

(IEEE1459 – 3.2.2.8 – NOTE 3 - pg 24)

### 5.6 Cálculo das THD's das Tensões e Correntes por fase e efetivas trifásica

Foram apresentadas, no item **5.3** as definições das tensões e correntes, fundamentais e harmônicas, por fase e efetivas trifásicas. Com base nessas informações pode-se calcular as THDs como segue:

### **5.6.1 Cálculo das THD's das Tensões e Correntes por fase:**

(IEEE1459 - item 3.1.2.1 - pg 8)

#### **5.6.1.1 Cálculo das THD's das Tensões fase:**

$$THD_{V_a} = \frac{V_{aH}}{V_{a1}} = \sqrt{\left(\frac{V_a}{V_{a1}}\right)^2 - 1}$$

$$THD_{V_b} = \frac{V_{bH}}{V_{b1}} = \sqrt{\left(\frac{V_b}{V_{b1}}\right)^2 - 1}$$

$$THD_{V_c} = \frac{V_{cH}}{V_{c1}} = \sqrt{\left(\frac{V_c}{V_{c1}}\right)^2 - 1}$$

#### **5.6.1.2 Cálculo das THD's das Correntes fase:**

$$THD_{I_a} = \frac{I_{aH}}{I_{a1}} = \sqrt{\left(\frac{I_a}{I_{a1}}\right)^2 - 1}$$

$$THD_{I_b} = \frac{I_{bH}}{I_{b1}} = \sqrt{\left(\frac{I_b}{I_{b1}}\right)^2 - 1}$$

$$THD_{I_c} = \frac{I_{cH}}{I_{c1}} = \sqrt{\left(\frac{I_c}{I_{c1}}\right)^2 - 1}$$

### **5.6.2 Cálculo das THD's da Tensão e Corrente Efetiva Trifásica:**

(IEEE1459 - item 3.2.3.1 - pg 28)

#### **5.6.2.1 Cálculo das THD da Tensão Efetiva Trifásica:**

$$THD_{V_e} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} = \sqrt{\left(\frac{V_e}{V_{e1}}\right)^2 - 1}$$

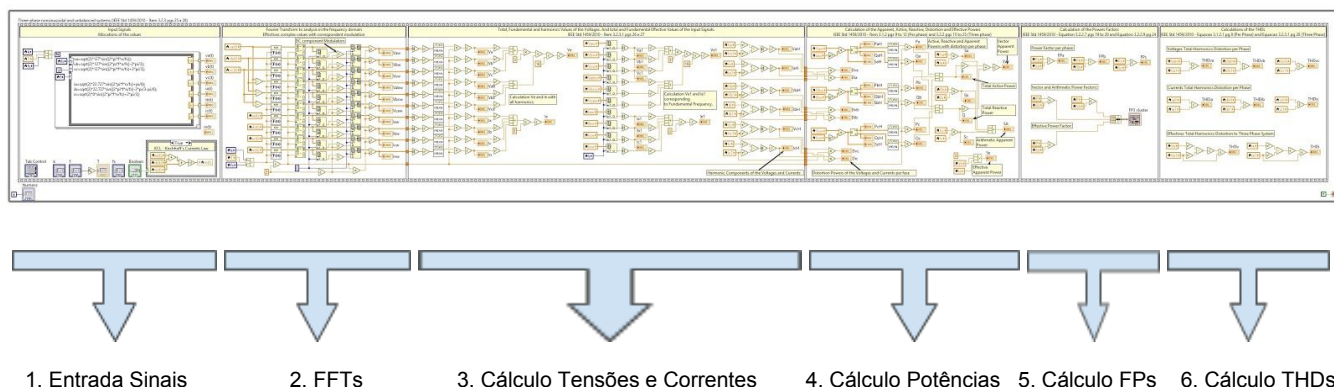
### 5.6.2.2 Cálculo da THD da Corrente Efetiva Trifásica:

$$THD_{I_e} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = \sqrt{\left(\frac{I_e}{I_{e1}}\right)^2 - 1}$$

## 6. DETALHAMENTO DA VI DESENVOLVIDA EM LABVIEW

A seguir será apresentada a estrutura desenvolvida em LABVIEW para processamento das informações, na sequência que até então foram apresentadas.

A Figura 6 a seguir mostra uma visão geral da VI desenvolvida e suas respectivas funções no processamento do sinal e que serão detalhadas em seguida:

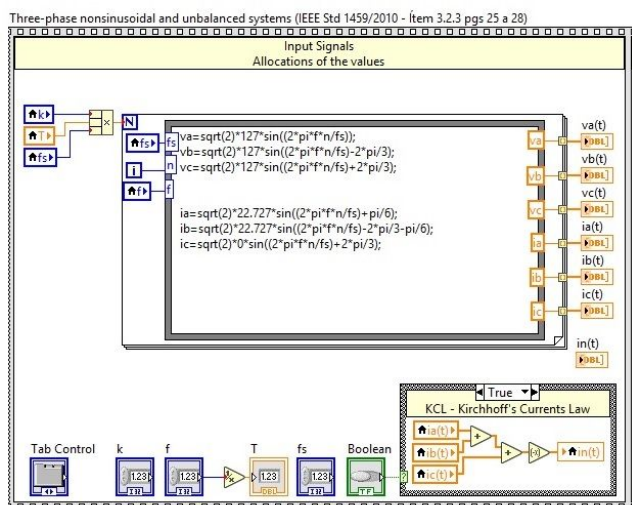


**Figura 6: Sequência de processamento das informações conforme item 5.**

Esta figura representa a sequência de processamento de dados como um todo, separado nas etapas por cada bloco da estrutura *flat sequence* elaborada no LabVIEW. A seguir serão descritas as variáveis de entrada e saída para cada bloco, respeitando a sequência apresentada em detalhes no item 5.

### 6.1 Entrada de Sinais:

Este bloco permite alocar e normalizar corretamente as entradas conforme a necessidade do protótipo, inicialmente configurada para simulação dos testes de validação, também permite configurar a medição para sistemas de quatro ou três linhas:



**Figura 7: Bloco de entrada dos sinais para correta configuração e normalização.**

Entradas:

f1 - Frequência fundamental

Fs - Frequência de Amostragem

### Amostras Tensões:

 $va(t), vb(t), vc(t)$ 

### Amostras Correntes:

#### 4 Linhas Mede-se:

 $ia(n), ib(n)$  e  $ic(n)$ 
$$\ln(n) = -(ia(n) + ib(n) + ic(n))$$

3 Linhas Mede-se apenas:

ia(n) e ib(n)

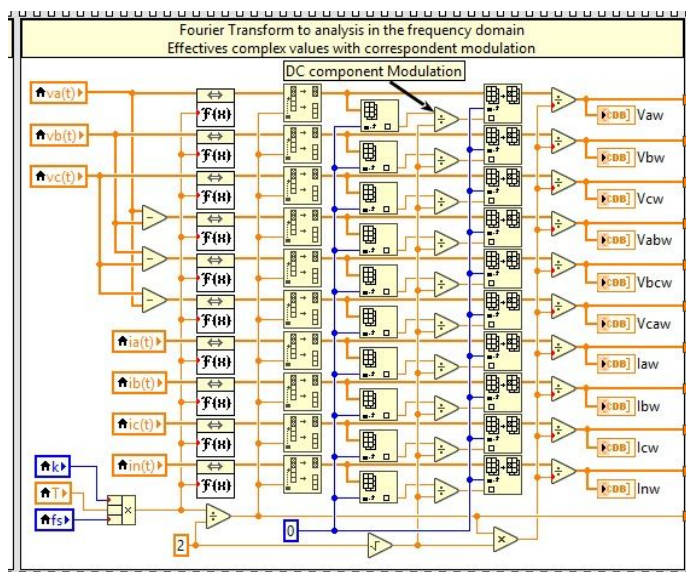
$$\text{in}(n)=0$$
$$ic(n) = -(ia(n) + ib(n))$$

Saídas:

Vetores:  $\mathbf{v}_a(t)$ ,  $\mathbf{v}_b(t)$ ,  $\mathbf{v}_c(t)$ ,  $\mathbf{i}_a(t)$ ,  $\mathbf{i}_b(t)$ ,  $\mathbf{i}_c(t)$  e  $\mathbf{i}_n(t)$

## 6.2 Aplicação e Normalização da Função Transformada de Fourier:

Coloca todos os sinais de entrada no domínio da frequência efetuando correta normalização das componentes de frequência zero e positivas:



**Figura 8: Bloco de aplicação da FFT aos sinais com adequada normalização.**

Entradas:

f1 - Frêquencia fundamental

k - ciclos de integração, k=15; período de integração 250ms (MOD002 Alarme)

Fs - Frequência de Amostragem

Vetores de Tensão e Corrente: va(t), vb(t), vc(t), ia(t), ib(t), ic(t) e In(t)

Saídas:

Vetores: Vaw(t), Vbw(t), Vcw(t), law(t), lbw(t), lcw(t) e Inw(t) de variáveis complexas que representam Magnitude e fase das tensões e correntes no domínio da frequência, com normalização adequada desde a componente de frequência zero ou DC (posição 0) até máxima harmônica recuperada, incluindo componente fundamental na posição (k), conforme detalhado no item 5.2.2 visto anteriormente.

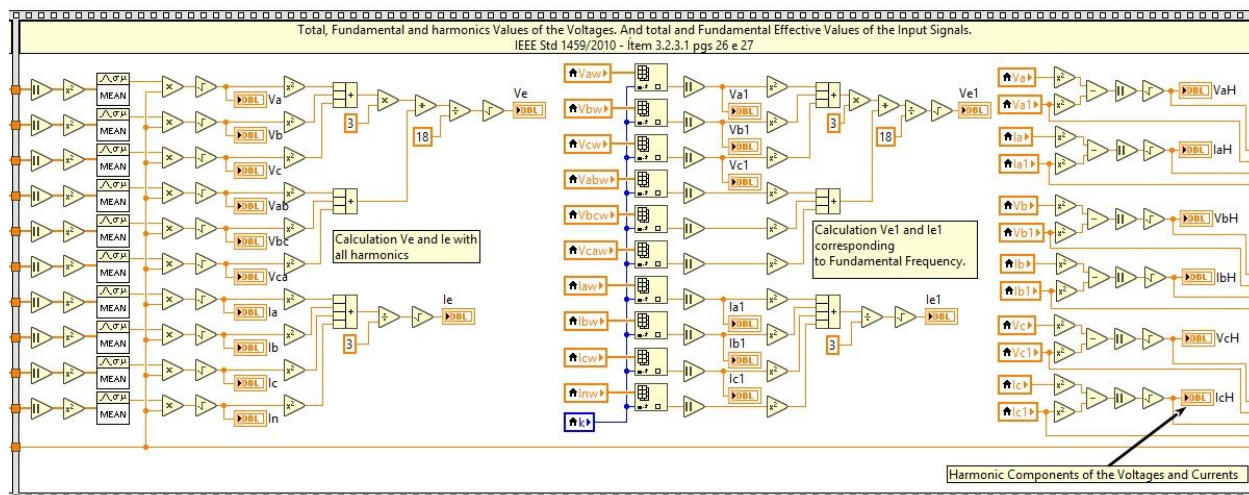
Para Fs=25kHz;

$h_{max} = F_s / 2 \cdot f$

$h = 25\text{kHz} / 2 \cdot 60 = 208$  (maior componente harmônica, conforme item 5.2.3).

### 6.3 Definição de Tensões e Correntes Fundamentais e harmônicas por fase e efetiva:

Com base nas informações no domínio da frequência se define as Tensões e Correntes Fundamentais e Harmônicas por fase e efetiva trifásica:



**Figura 9: Bloco definição de Tensões e Correntes, por fase e efetiva trifásica.**

Entradas:

Vetores:  $V_{aw}(t)$ ,  $V_{bw}(t)$ ,  $V_{cw}(t)$ ,  $I_{aw}(t)$ ,  $I_{bw}(t)$ ,  $I_{cw}(t)$  e  $I_{nw}(t)$  com normalização adequada.

Saídas:

Por fase:

Tensões:

$V_a$ ,  $V_{a1}$ ,  $V_{aH}$ ,  $V_b$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{bH}$ ,  $V_c$ ,  $V_{c1}$  e  $V_{cH}$

Correntes:

$I_a$ ,  $I_{a1}$ ,  $I_{aH}$ ,  $I_b$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{bH}$ ,  $I_c$ ,  $I_{c1}$  e  $I_{cH}$

Efetiva Trifásica:

Tensões:

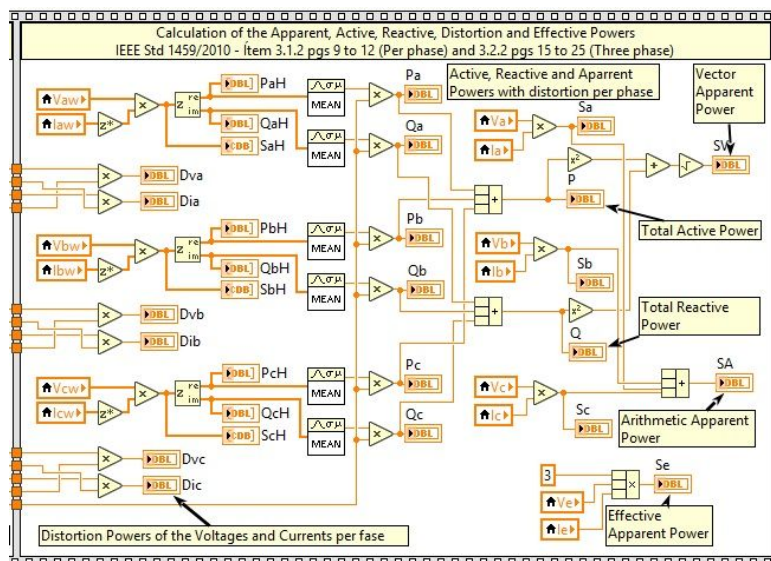
$V_e$ ,  $V_{e1}$  e  $V_{eH}$

Correntes:

$I_e$ ,  $I_{e1}$  e  $I_{eH}$

#### 6.4 Cálculo de Potências Ativas, Reativas, Aparente por fase e efetiva trifásica:

Após definição das Tensões e Correntes Totais, Fundamentais e Harmônicas por fase e Efetivas Trifásica, calcula-se as potências por fase e trifásica, conforme apresentação teórica do item 5.4:



**Figura 10: Bloco para cálculo das Potências, por fase e efetivas trifásica.**

Entradas:

Tensão:

Vetores:  $V_{aw}(t)$ ,  $V_{bw}(t)$  e  $V_{cw}(t)$ , com normalização adequada.

Valores:  $V_a$ ,  $V_{a1}$ ,  $V_{aH}$ ,  $V_b$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{bH}$ ,  $V_c$ ,  $V_{c1}$ ,  $V_{cH}$ ,  $V_e$ ,  $V_{e1}$  e  $V_{eH}$

Correntes:

Vetores:  $I_{aw}(t)$ ,  $I_{bw}(t)$ ,  $I_{cw}(t)$  e  $I_{nw}(t)$ , com normalização adequada.

Valores:  $I_a$ ,  $I_{a1}$ ,  $I_{aH}$ ,  $I_b$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{bH}$ ,  $I_c$ ,  $I_{c1}$ ,  $I_{cH}$ ,  $I_e$ ,  $I_{e1}$  e  $I_{eH}$ .

Saídas:

Por fase:

$P_a$ ,  $Q_a$ ,  $S_a$ ,  $P_b$ ,  $Q_b$ ,  $S_b$ ,  $P_c$ ,  $Q_c$  e  $S_c$

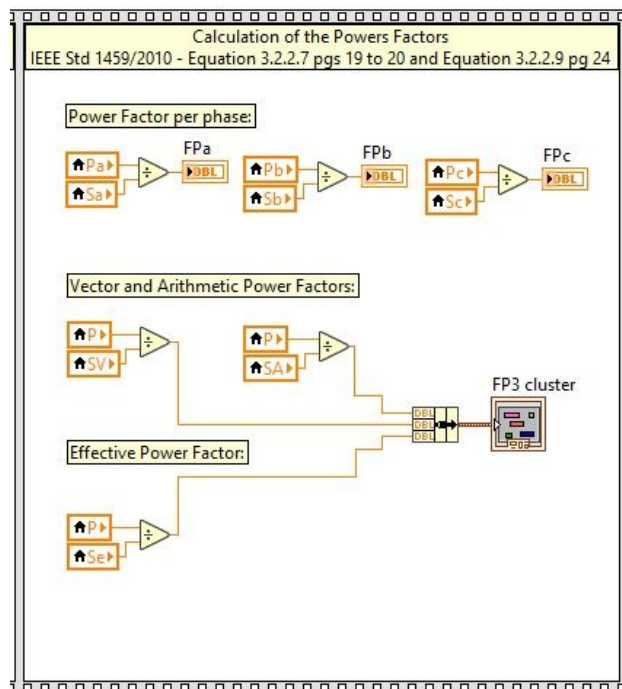
Trifásica:

$P$  (potência Ativa Total),  $Q$  (potência Reativa Total),  $SV$ ,  $SA$ ,  $Se$ .

## 6.5 Cálculo dos Fatores de Potência por fase, Vetorial, Aritmético e Efetivo trifásico:



Com os resultados das potências por fase e trifásica, calcula-se os fatores de potências, conforme apresentação teórica do item 5.5:



**Figura 11: Bloco para cálculo dos Fatores de Potências, por fase e trifásicos.**

Entradas:

Por fase:

Pa, Sa, Pb, Sb, Pc, Sc.

Trifásico:

P, SA, SV e Se.

Saídas:

Por fase:

FPa, FPb e FPc

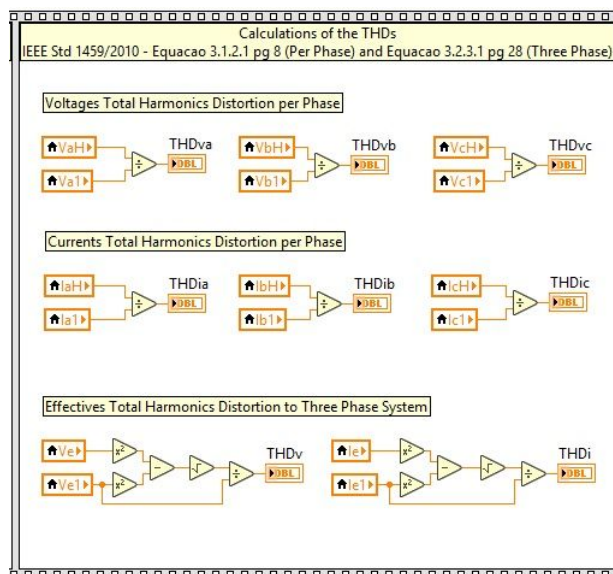
Trifásica:

CLUSTER com FPA (Aritmético), FPV (Vetorial) e FPe (Efetivo).

## 6.6 Cálculo das THD's das Tensões e Correntes por fase e efetivas trifásica:



Por fim, com os resultados das Tensões Fundamentais e Harmônicas conforme definido no item 5.3 pode-se calcular as THD's das Tensões e das Correntes por fase e efetivas trifásicas, conforme definição teórica do item 5.6:



**Figura 12: Bloco para cálculo das THDs das Tensões e Correntes, por fase e trifásicas.**

Entradas:

Por fase:

Tensões:  $V_{a1}$ ,  $V_{aH}$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{bH}$ ,  $V_{c1}$  e  $V_{cH}$ .

Correntes:  $I_{a1}$ ,  $I_{aH}$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{bH}$ ,  $I_{c1}$  e  $I_{cH}$

Trifásica:

Tensões:  $V_{e1}$  e  $V_{eH}$

Correntes:  $I_{e1}$  e  $I_{eH}$

Saídas:

Por fase:

THDva, THDvb, THDvc, THDia, THDib e THDic

Trifásica:

THDv (Distorção Harmônica Total da  $V_e$ )

THDi (Distorção Harmônica Total da  $I_e$ ).

## 6.7 Bloco VI MIMO configuração inicial:

<u>va(n)</u>	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	F <sub>Pa</sub>
<u>vb(n)</u>							F <sub>Pb</sub>
<u>vc(n)</u>							F <sub>Pc</sub>
Cluster: f1, F <sub>s</sub> e k							P <sub>total</sub>
<u>ia(n)</u>	THD <u>va</u>	THD vb	THD vc	THD ia	THD ib	THD ic	Q <sub>total</sub>
<u>ib(n)</u>							Cluster: F <sub>PA</sub> , F <sub>PV</sub> e F <sub>PE</sub>
<u>ic(n)</u>							THD <sub>ve</sub>
							THD <sub>ie</sub>

Figura 13: Bloco VI MIMO, com representação de suas entradas e saídas.

**Entradas:**  $va(n)$ ,  $vb(n)$ ,  $vc(n)$ ,  $ia(n)$ ,  $ib(n)$ ,  $ic(n)$  e  $cluster(f1, F_s, k)$ ;

**Saídas:**  $Pa$ ,  $Pb$ ,  $Pc$ ,  $Qa$ ,  $Qb$ ,  $Qc$ ,  $THD_{va}$ ,  $THD_{vb}$ ,  $THD_{vc}$ ,  $THD_{ia}$ ,  $THD_{ib}$ ,  $THD_{ic}$ ,  $F_{pa}$ ,  $F_{pb}$ ,  $F_{pc}$ ,  $P_{total}$ ,  $Q_{total}$ ,  $cluster(F_{PA}, F_{PV}$  e  $F_{PE})$ ,  $THD_{ve}$  e  $THD_{ie}$ .

Após configuração das entradas e saídas, compactou-se a aplicação desenvolvida para uma SubVI para Cálculo de Fator de Potência Trifásico Efetivo, segundo Norma IEEE1459-2010 onde foi personalizada conforme ícone abaixo:

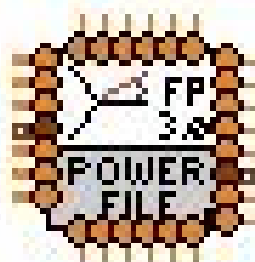
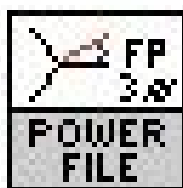


Figura 14: Bloco VI MIMO com apresentação de suas entradas e saídas.

Apesar da utilização da estrutura TAB CONTROL para melhor organização das variáveis no FrontPanel desta VI, este item não foi apresentado porque não faz parte do foco do estudo, pois, esta aplicação será configurada diretamente por suas entradas não havendo necessidade de acesso ao FrontPanel.

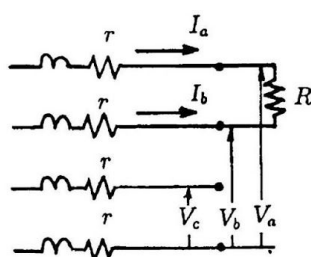
## 7. RESULTADOS OBTIDOS

Para validação dos resultados computacionalmente foram utilizados três exemplos apresentados na Norma IEEE 1459, o exemplo do item 3.2.2.8 da página 21 sobre Potência Aparente Efetiva que muito se assemelha ao protótipo que está sendo desenvolvido, o Anexo A página 30 da norma sobre efeitos do intervalo de integração; e o Anexo B da página 34 que apresenta resultados sobre efeitos harmônicos.

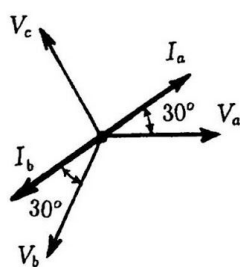
Além disso, também serão realizadas validações dos cálculos do THD através da medição de sinal conhecido gerado pelo Gerador de funções, utilizando a MyRio para aquisição dos sinais.

### 7.1 Circuito monofásico conectado entre duas fases: (IEEE1459 - item 3.2.2.8 - pg 21)

No primeiro exemplo tem-se os resultados dos diferentes Fatores de Potência Trifásicos para uma carga monofásica conectada entre duas fases, que tem a mesma configuração do protótipo desenvolvido, exceto pelo fato de ser uma carga ao invés de uma geração.



(a) actual circuit.



(c) phasor diagram.

Valores Efetivos Sistema Trifásico
$\ S_e = 3V_e I_e$
$V_e = V; \quad I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2}{3}} = \frac{\sqrt{2} V}{R}$
$S_e = 3\sqrt{2} \frac{V^2}{R}; \quad P = \frac{3V^2}{R}$

LEMBRANDO:

The vector power factor is

$$PF_V = P / S_V = 1.0$$

The arithmetic power factor is

$$PF_A = P / S_A = \sqrt{3} / 2 = 0.866$$

The effective power factor is

$$PF_e = \frac{P}{S_e} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 < PF_A < PF_V$$

Este exemplo realizado computacionalmente para valores compatíveis ao do protótipo conforme abaixo:

$$P=220 \cdot 22,73 \cdot \cos(0)$$

$$S=P=5000W$$

$$FP_{inv} \approx 1$$

Se obteve-se os seguintes resultados:

**Para fase A:**

$$P_a = 2499.66 \text{ W} \quad Q_a = -1443.18 \text{ var} \quad FPa = 0.8660 \text{ ok}$$

**Para fase B:**

$$P_b = 2499.66 \text{ W} \quad Q_b = 1443.18 \text{ var} \quad FP_b = 0.8660 \text{ ok}$$

**Sistema Trifásico:**

$$P = 5000 \text{ W} \quad Q = 0 \text{ var}$$

Fator de Potência Trifásico Vetorial:

$$SV = \sqrt{P^2 + Q^2} = 5000 \text{ VA} ; \quad Fpv = P/SV = 1.0000 \text{ ok}$$

Fator de Potência Trifásico Aritmético:

$$SA = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} + \sqrt{P_b^2 + Q_b^2} = 5769 \text{ VA} ; \quad FPA = P/SA = 0.8660 \text{ ok}$$

Fator de Potência Trifásico Efetivo:

$$Se = 3VeIe = 7071 \text{ VA} ; \quad FPe = P/Se = 0.7071 \text{ ok}$$

## 7.2 Efeitos do intervalo de integração: (IEEE1459 - Anexo A - pg 30)

Nesta simulação, é possível evidenciar os efeitos do intervalo de integração e validar os resultado para um intervalo suficientemente adequado, vale ressaltar que este exemplo fornece um sinal de entrada com primeira subharmônica na ordem de  $n=0.0217$  o que necessita um número de ciclos fundamentais relativamente alto para convergência dos resultados.

Abaixo a tabela com informações sobre Magnitude e Fase das diferentes componentes subharmônicas, interharmônicas e harmônicas para os sinais de tensão e de corrente que servirão de entrada para análise computacional:

**Table A.1—Phasors and the active powers of the studied load**

<b>h</b>	<b>f (Hz)</b>	<b><math>V_h/\alpha_h</math> (V)</b>	<b><math>I_h/\beta_h</math> (A)</b>	<b><math>P_h = V_h I_h \cos(\beta_h - \alpha_h)</math> (W)</b>
0.0217	1.302	$3.5 \cdot 10^{-4} / -90.0$	$1.48 / 80.2$	$-5.1734 \cdot 10^{-4}$
0.0433	2.598	$1.4 \cdot 10^{-3} / -107.3$	$2.26 / -8.4$	$-4.9507 \cdot 10^{-4}$
0.957	57.42	$0.16 / -75.5$	$0.92 / -173.5$	-0.0208
0.978	58.68	$0.56 / -97.2$	$2.24 / -193.2$	-0.1329
1.0	60	$70.71 / -7.2$	$70.71 / -42.4$	4085.72
1.022	61.32	$0.46 / -82.9$	$1.75 / -178.9$	-0.08425
1.043	62.58	$0.35 / -104.3$	$0.91 / -202.3$	-0.04488
3.0	180	$5.02 / -76.0$	$19.09 / 18.3$	-7.18671
4.268	256.1	$0.95 / 176.4$	$5.43 / -87.0$	-0.59219
5.0	300	$3.18 / -114.0$	$7.64 / -15.8$	-3.46588
7.0	420	$2.33 / -142.0$	$3.68 / -43.2$	-1.31261
9.0	540	$1.13 / -165.0$	$1.41 / -69.0$	-0.16724

The voltage and current waves contain harmonics (fundamental, 3rd, 5th, 7th, and 9th) as well as three interharmonics ( $h = 1.022, 1.043$ , and  $4.268$ ) and four subsynchronous interharmonics ( $h = 0.0217, 0.0433, 0.957$ , and  $0.978$ ).

$$P = P_1 + P_H = V_1 I_1 \cos(\Theta_1) + V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\Theta_h) = 4072,71 \text{ W}$$

(IEEE1459 - item 3.1.2.3 a 3.1.2.5 - pg 9)

Realizando análise para diferentes intervalos de integração, se obteve os seguintes resultados de saída:

Para k=15 ciclos fundamentais (0,0054 ciclos da primeira subharmônica)

Pa = 4098.30 W

Para k=234 ciclos fundamentais (5,0778 ciclos da primeira subharmônica)

Pa = 4071.72 W

Para k=3000 ciclos fundamentais (65,1 ciclos da primeira subharmônica)

Pa = 4072,66 W

Ainda para um número de ciclos relativamente alto, a pequena diferença entre P=4072,71 W da norma e P(calculado)=4072.66 W existe devido ao Período de Integração conter número de Ciclos incompletos (IEEE1459 - item 3.1.2.5 - Nota 3 - pg10). Também vale notar que essa diferença é muito pequena para um número relativamente alto de ciclos.

$$\varepsilon = \frac{4072,71 - 4072,66}{4072,71} \cdot 100\% = 0,0012\%$$

### **7.3 Cálculo da Distorção Harmônica: (IEEE1459 - Anexo B - pg 34)**

Nesta última simulação faz-se a validação dos métodos de cálculos das THDs das tensões e correntes na aplicação desenvolvida:

$$\begin{aligned}v_1 &= \sqrt{2} 100 \sin(\omega t - 0^\circ) & i_1 &= \sqrt{2} 100 \sin(\omega t - 30^\circ) \\v_3 &= \sqrt{2} 8 \sin(3\omega t - 70^\circ) & i_3 &= \sqrt{2} 20 \sin(3\omega t - 165^\circ) \\v_5 &= \sqrt{2} 15 \sin(5\omega t + 140^\circ) & i_5 &= \sqrt{2} 15 \sin(5\omega t + 234^\circ) \\v_7 &= \sqrt{2} 5 \sin(7\omega t + 20^\circ) & i_7 &= \sqrt{2} 10 \sin(7\omega t + 234^\circ)\end{aligned}$$

The calculated active powers are summarized in Table B.1.

**Table B.1—Active powers**

$P_1$ (W)	$P_3$ (W)	$P_5$ (W)	$P_7$ (W)	$P$ (W)	$P_H$ (W)
8660.00	-13.94	-11.78	-1.74	8632.54	-27.46

**Table B.2—Reactive powers**

$Q_1$ (var)	$Q_3$ (var)	$Q_5$ (var)	$Q_7$ (var)
5000.00	159.39	-224.69	49.97

$V = 101.56$  V and  $I = 103.56$  A  
with the total harmonic distortions  
 $THD_V = 0.177$  and  $THD_I = 0.269$

Como o exercício proposto é para apenas uma fase, no código desenvolvido se utilizou apenas as entradas  $v_a$  e  $i_a$ , se obteve os seguintes resultados:

$$P_a = 8589.16 \text{ W} \quad Q_a = 4962.90 \text{ var}$$

$$V_a = 101.56 \text{ V} \quad I_a = 103.56 \text{ A}$$

$$THD_{V_a} = 0.1772 \quad THD_{I_a} = 0.2693$$

Neste exemplo evidenciamos algumas incoerência nos valores da tabela **B.1** e **B.2** trazidas na norma IEEE1459-2010, o que resultou na diferença de  $P$  e  $Q$ , pois:

$$P_5 = V_{ef5} I_{ef5} \cos(\theta_{v5} - \theta_{i5}) = 15 \cdot 15 \cdot \cos(-94^\circ) = -15,94 \text{ W}$$

$$P_7 = V_{ef7} I_{ef7} \cos(\theta_{v7} - \theta_{i7}) = 5 \cdot 10 \cdot \cos(-214^\circ) = -41,45 \text{ W}$$

$$Q_5 = V_{ef5} I_{ef5} \sin(\theta_{v5} - \theta_{i5}) = 15 \cdot 15 \cdot \sin(-94^\circ) = -224,45 \text{ var}$$

$$Q_7 = V_{ef7} I_{ef7} \sin(\theta_{v7} - \theta_{i7}) = 5 \cdot 10 \cdot \sin(-214^\circ) = 27,96 \text{ var}$$

## 7.4 Ensaio com Função conhecida através do gerador de função:

Neste ensaio, será utilizado os geradores de funções, segundo “Relatório\_Gerador” que servirá como sinal de aquisição através da MyRio para validação através de um cenário conhecido e real.

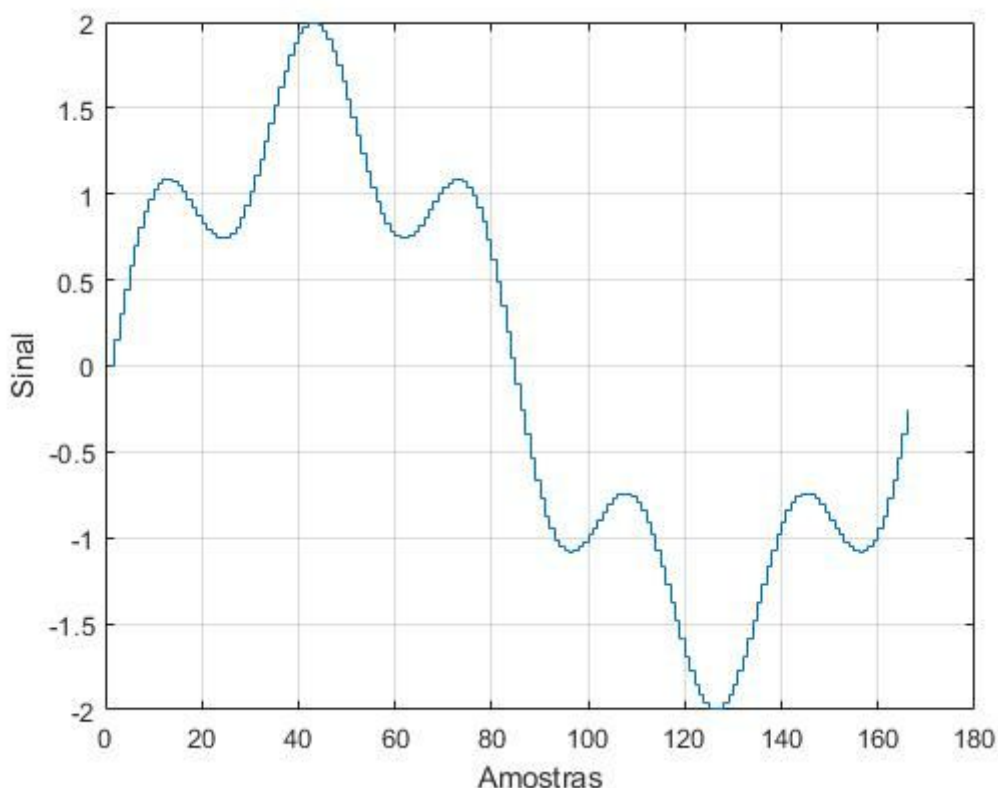
Os valores serão atribuídos aos geradores de funções pelo MATLAB o qual será realizado aquisição:

### 7.4.1 Teste de sinal de entrada para tensão:

Sinal de entrada na fase a:

$A=1$ ;

$s1 = (0.95*A)*\sin(w1*t+phase) + (0.02*A)*\sin(3*w1*t) + (0.3*A)*\sin(5*w1*t);$



**Figura 15: Sinal de entrada gerado pelo Gerador de Funções do MDO3014.**



THD conhecido a partir do cálculo definido em **5.6.1**:

$$THD_{V_a} = \frac{V_{aH}}{V_{a1}} = \sqrt{\left(\frac{V_a}{V_{a1}}\right)^2 - 1}$$

Onde:

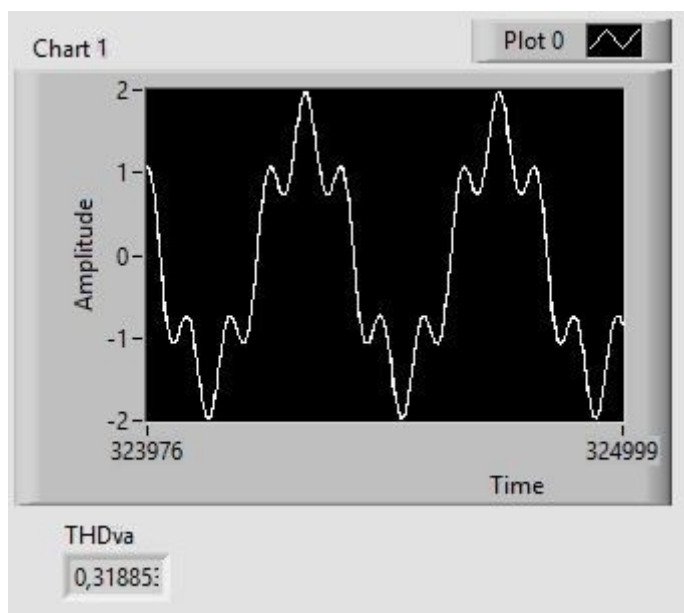
$$V_{a1} = A = 0.95$$

$$V_{a1} = \sqrt{V_{a0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} V_{ah}^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,3^2} = 0,3007 \quad (\text{Item 5.3.1.3.1})$$

Então:

$$THD_{V_a} = \frac{0,3007}{0,95} = 0,3165$$

Abaixo os resultados apresentados pela aplicação desenvolvida:



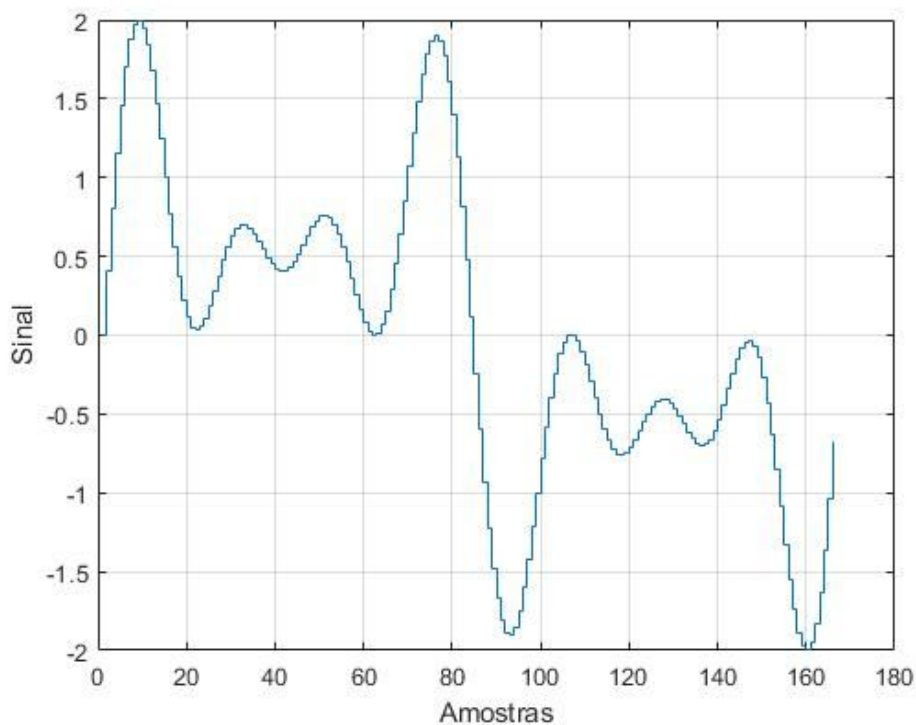
**Figura 16: Resultado apresentado pela aplicação desenvolvida.**

### 7.4.2 Teste de sinal de entrada para corrente:

Sinal de entrada na fase a:

$A=1$ ;

$s1=(A)*\sin(w1*t+phase) + (0.76*A)*\sin(3*w1*t) + (A)*\sin(5*w1*t) + (0.7*A)*\sin(7*w1*t) + (0.1*A)*\sin(8*w1*t)$



**Figura 17: Sinal de entrada gerado pelo Gerador de Funções do MDO3014.**

THD conhecido a partir do cálculo definido em **5.6.1**:

$$THD_{Ia} = \frac{I_{aH}}{I_{a1}} = \sqrt{\left(\frac{I_a}{I_{a1}}\right)^2 - 1}$$

**Onde:**

$$I_{a1} = A = 1$$

$$I_{a1} = \sqrt{I_{a0}^2 + \sum_{h \neq 1}^{Hmax} I_{ah}^2} = \sqrt{0,76^2 + 1^2 + 0,7^2 + 0,1^2} = 1,4414 \quad (\text{Item 5.3.1.3.2})$$

Então:

$$THD_{Ia} = \frac{1,4414}{1} = 1,4414$$

Abaixo os resultados apresentados pela aplicação desenvolvida:

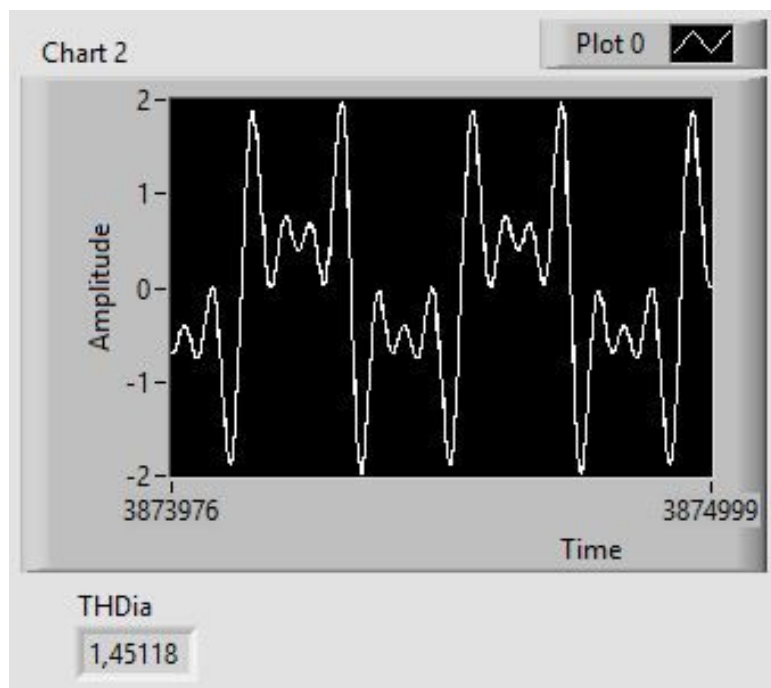


Figura 18: Resultado apresentado pela aplicação desenvolvida.

## 7.5 Comparação dos resultados com o MARH21:

## **8. ACOPLAMENTO AO PROTÓTIPO 3.0 COMPACTRIO.**

## **9. CONCLUSÕES**

A Norma IEEE 1459-2010 contempla sistemas reais de forma generalizada, adotando padrões e métodos que fazem equivalência aos efeitos de diferentes configurações e característica de Sistemas de Potência, sendo muito relevante na área da Eletrotécnica.

As definições de Fatores de Potência Trifásico da norma, trazem diferentes métodos de avaliar os efeitos de uma instalação sobre o sistema Trifásico, partindo Fator de Potência Vetorial com menores consideração até o Fator de Potência Efetivo que faz exigência de sistemas equilibrados para que se tenha bons valores. Deste modo podem ser aplicado desde sistemas simples como uma carga consumidora até sistemas grandes que requerem melhores parâmetros de qualidade como grande usinas de geração.

Contudo, pode se concluir que as atribuições da norma IEEE1459-2010 trás excelentes contribuições ao desenvolvimento de Sistemas de Monitoramento e Gerenciamento de Usinas de Geração.

## **10. REFERÊNCIAS**

IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.

Disponível em:

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod\\_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf)

Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku.

Fundamentos de Circuitos Elétricos – 5ª Edição.