



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/24

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS

**Modelo Dinâmico de Filtro Ativo para a Comprovação de sua Eficácia
na Média Tensão para a Redução de Distorções Harmônicas**

Franklin Clement Véliz (*)
CEPEL

Sergio Luis Varricchio
CEPEL

Cristiano de Oliveira Costa
CEPEL

Octávio Augusto da Cunha
POWER SOLUTION ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato Campos Amaral
ENERWATT ENGENHARIA

RESUMO

Frequentemente os estudos de desempenho harmônico, relativos às novas instalações no Sistema Interligado Nacional (SIN) que possuam um alto conteúdo harmônico, acusam a necessidade de custosos filtros passivos para atenuar as distorções harmônicas de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) a valores dentro dos limites especificados nos Procedimentos de Rede (PR) do ONS [1]. Estes custosos equipamentos motivaram o surgimento de uma nova opção de atenuação de distorções harmônicas baseada no uso de filtros ativos na média tensão [2]. Contudo, o modelo elétrico de filtros ativos que viabilizaria esta nova opção mitigadora, assim como outra aplicação importante [3], descreve o desempenho destes equipamentos apenas no regime permanente (RP) (regime de atuação das correntes e tensões harmônicas). Portanto, para comprovar este modelo de RP (descrito em [2] e replicado no item 2.0) e se poder realizar uma avaliação aproximada da iteração dinâmica destes equipamentos com a rede elétrica, neste trabalho se desenvolveu um modelo dinâmico simplificado para estes filtros. Desta maneira, foi simulado no PSCAD o mesmo caso exemplo de acesso de um complexo eólico ao SIN apresentado em [2], representando os filtros ativos pelo seu modelo dinâmico proposto. Os resultados da simulação mostraram que o desempenho destes filtros, após o regime transitório (RT), é idêntico ao desempenho produzido pelo modelo de RP, comprovando-se assim a sua efetividade. Esta comprovação reforça a possibilidade de se utilizar estes filtros na mitigação de distorções na média tensão, permitindo assim usufruir todos os seus benefícios [2].

PALAVRAS-CHAVE

Distorções harmônicas, modelos de filtros ativos, média tensão, controle de malha fechada.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para se conectarem ao SIN, as novas instalações com cargas não lineares significativas deverão realizar estudos de desempenho harmônico no PAC utilizando o Método dos Lugares Geométricos (MLG) recomendado pelo ONS através de seus PR [1]. Em princípio, este método corresponde a uma avaliação conservadora do impacto harmônico no PAC provocado pelas cargas não lineares da nova instalação, onde a mesma é representada pelo seu equivalente de Norton e o SIN por um lugar geométrico (LG) de admitâncias. A utilização deste LG objetiva retratar a variação da admitância do SIN vista do PAC durante a vida útil da instalação.

Frequentemente estes estudos acusam a necessidade de medidas corretivas para atenuar as distorções harmônicas de tensão no PAC. Entre as medidas corretivas praticadas no setor elétrico, tem-se, principalmente, a inserção de filtros passivos na média tensão. Via de regra, os estudos indicam a necessidade de filtros de baixa ordem harmônica de altas potências, elevando significativamente os custos dos empreendimentos.

Os custos elevados destes filtros, associados ao suposto conservadorismo do MLG [2] utilizado para o projeto dos mesmos, resultaram na proposta de uma nova opção de atenuação de distorções harmônicas: a utilização de filtros ativos na média tensão [2]. Esta nova opção de atenuação permitirá usufruir de diversas vantagens. Entre estas

vantagens, cita-se a flexibilidade na filtragem dos harmônicos e/ou inter-harmônicos de relevância na faixa de frequência de interesse, a blindagem da nova instalação perante o SIN, a impossibilidade de geração de ressonâncias paralelas e, em muitos casos, a reduzida potência requerida (redução significativa de custos) por estes equipamentos para atender aos limites dos PR do ONS. Contudo, o modelo elétrico do filtro ativo (descrito em [2] e replicado no item 2.0) que possibilitaria quantificar seu desempenho harmônico e, conseqüentemente, verificar suas vantagens, apenas descreve o comportamento deste equipamento no RP. Portanto, de modo a comprovar este modelo de RP e se poder realizar uma análise aproximada da interação dinâmica destes equipamentos com a rede elétrica, foi simulado no PSCAD o mesmo caso exemplo de acesso do complexo eólico ao SIN apresentado em [2], mas, agora, representando os filtros ativos pelo seu modelo dinâmico proposto simplificado, que utiliza os componentes básicos inerentes do sistema de controle de malha fechada de filtros ativos reais, como o controlador PI, transdutor de corrente, sincronizador de fase e fonte de geração de corrente harmônica.

2.0 - MODELO ELÉTRICO DE REGIME PERMANENTE DO FILTRO ATIVO (MODELO DE RP)

Um sistema típico operando no RP numa frequência (harmônica) específica como, por exemplo, um parque eólico ou solar, uma usina siderúrgica ou uma mineradora, pode ser representado pelo equivalente fasorial mostrado na Figura 1, sendo V_C a tensão da barra coletora de média tensão onde o filtro (I_F) foi instalado, I_N a corrente equivalente vista desta barra coletora (corrente de Norton), Z_N a impedância equivalente vista da mesma barra (impedância de Norton), Z_{TR} a impedância do transformador acoplador, V_S a tensão do barramento de alta do transformador da subestação da nova instalação, Y_{LT} e Z_{LT} a metade da admitância capacitiva e a impedância série da linha de transmissão (LT) principal, respectivamente, V_{PAC} a tensão do PAC, TC o transformador de corrente que viabiliza o controle de malha fechada do filtro. Finalmente, Z_{SIN} e V_{SIN} denotam a impedância e a tensão do equivalente de Thévenin do SIN visto do PAC, respectivamente.

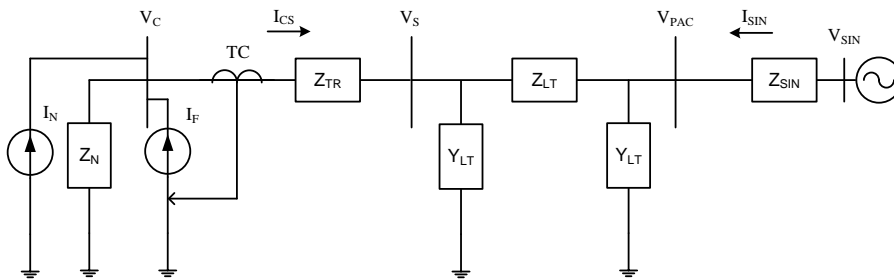


Figura 1: Circuito equivalente com um filtro ativo e com fontes harmônicas na nova instalação e no SIN

A partir deste sistema, é demonstrado detalhadamente em [2] que o filtro ativo atende à equação mostrada em (1):

$$I_F = I_{F1} + I_{F2} = -I_N + \frac{V_S}{Z_N} \quad \text{onde } V_S = V_C \quad (1)$$

sendo I_{F1} e I_{F2} as parcelas da corrente injetadas pelo filtro para compensar as correntes provenientes da nova instalação e do SIN, respectivamente. Supõe-se que o comportamento do filtro no final do RT atingirá os mesmos resultados indicados por este modelo de RP. Portanto, para validar esta equação será necessário utilizar o modelo dinâmico proposto.

3.0 - MODELO ELÉTRICO DINÂMICO DO FILTRO ATIVO (MODELO DE RT)

A incerteza relativa à capacidade do filtro de atingir o mesmo desempenho especificado pelo modelo de RP, após as sucessivas atuações do seu controle de malha fechada, somente será esclarecida com a representação dinâmica deste equipamento. Portanto, neste trabalho se desenvolveu um modelo dinâmico simplificado do filtro capaz de reproduzir a principal característica deste equipamento, que consiste na injeção de uma corrente que elimine a corrente em análise (corrente harmônica lida pelo TC). Para lograr este objetivo, o modelo dinâmico proposto para o filtro ativo utiliza os mesmos componentes básicos inerentes do seu sistema de controle de malha fechada. Isto é, utiliza um controlador PI, um transdutor de corrente, um sincronizador de fase e uma fonte de geração de corrente harmônica. Este modelo proposto é simplificado porque foi projetado para operar em apenas uma frequência (harmônica) de análise. Desta maneira, vários dos sofisticados equipamentos e técnicas de análise, comumente presentes nos filtros ativos, puderam ser representados por modelos simplificados. Assim, a fonte de tensão do conversor (VSC), controlada por um modulador de largura de pulso (PWM), cujo objetivo é controlar a corrente injetada, foi modelada por uma fonte de corrente harmônica controlada. O sincronizador de fase (PLL), que é o equipamento que sincroniza o ângulo de defasagem da corrente harmônica de interesse (corrente lida pelo TC) com o sistema de controle, foi modelado por um simples diagrama de blocos desenvolvido no PSCAD (Figura 2). A técnica de identificação da corrente harmônica instantânea avaliada (ex: teoria PQ instantânea) foi desnecessária, uma vez que toda a rede elétrica foi representada apenas na frequência (harmônica) de análise.

Todos os componentes do modelo dinâmico proposto são apresentados no caso exemplo (item: Resultados).

4.0 - RESULTADOS

Para comprovar o modelo de RP do filtro ativo, indicado em (1), foi implementado no PSCAD o mesmo sistema exemplo apresentado em [2] para o caso mais crítico, isto é, para o 3º harmônico, pois o mesmo indicou a máxima distorção de tensão (8,148 %). Este sistema trata sobre um complexo eólico (CE) de 180 MW (90 aerogeradores de 2 MW) acessando o SIN através de seis parques eólicos agrupados em dois ramos coletores que possuem filtros ativos. Todos os elementos e dispositivos deste CE e do SIN são exibidos da Figura 2 a Figura 6. Os dados e especificações não indicados nestas figuras estão descritos na Tabela 1.

Para enfatizar a comprovação do modelo de RP, também foi considerada na mesma simulação a modificação da reatância do SIN de modo a ressonar (aproximadamente) com a impedância do CE. Esta modificação foi realizada invertendo-se os estados das chaves ch1 e ch2, mostradas na Figura 2, que estavam originalmente fechada e aberta, respectivamente. Os filtros foram ligados e desligados em instantes de tempo definidos pela atuação dos sinais IR3 (caso mais crítico de [2]) e IR5 (caso ressonante), conforme descrito na Tabela 1. Todos os instantes relativos à atuação dos filtros e modificação da reatância do SIN podem ser claramente identificados nos gráficos apresentados da Figura 8 a Figura 22. Note que para o 3º harmônico, a representação das LTs do CE por um Pi equivalente foi suficiente.

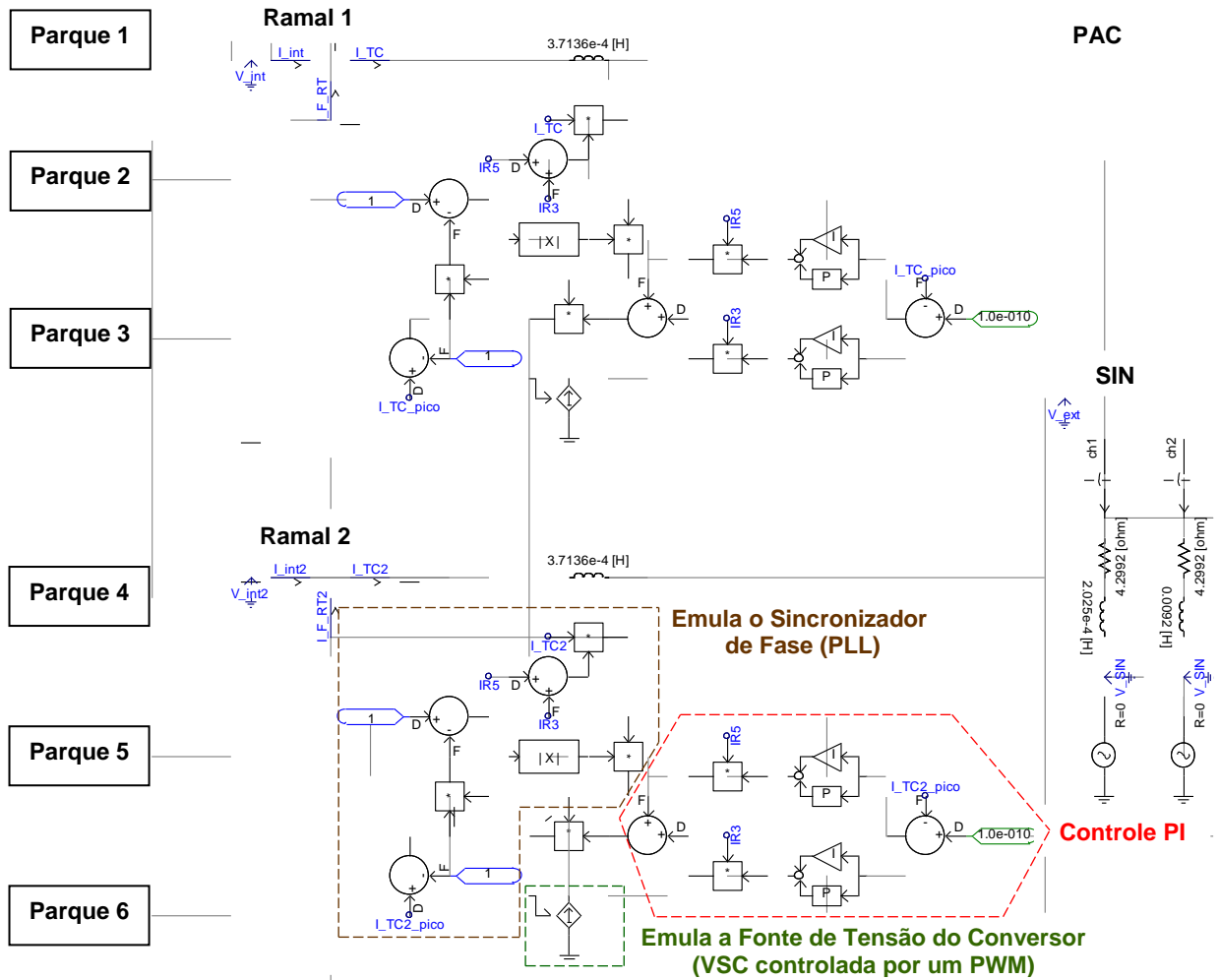


Figura 2: Complexo eólico exemplo modelado no PSCAD (Parte 1 – Acoplamento dos Parques ao SIN)

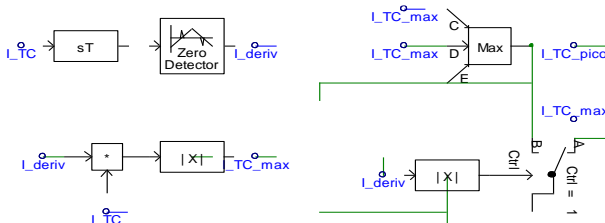


Figura 3: Dispositivo que transforma senóides em retas apropriadas para o controle PI

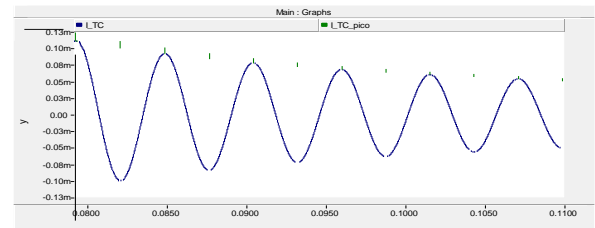


Figura 4: Exemplo de senóide (L_{TC}) transformada em retas (L_{TC_pico})

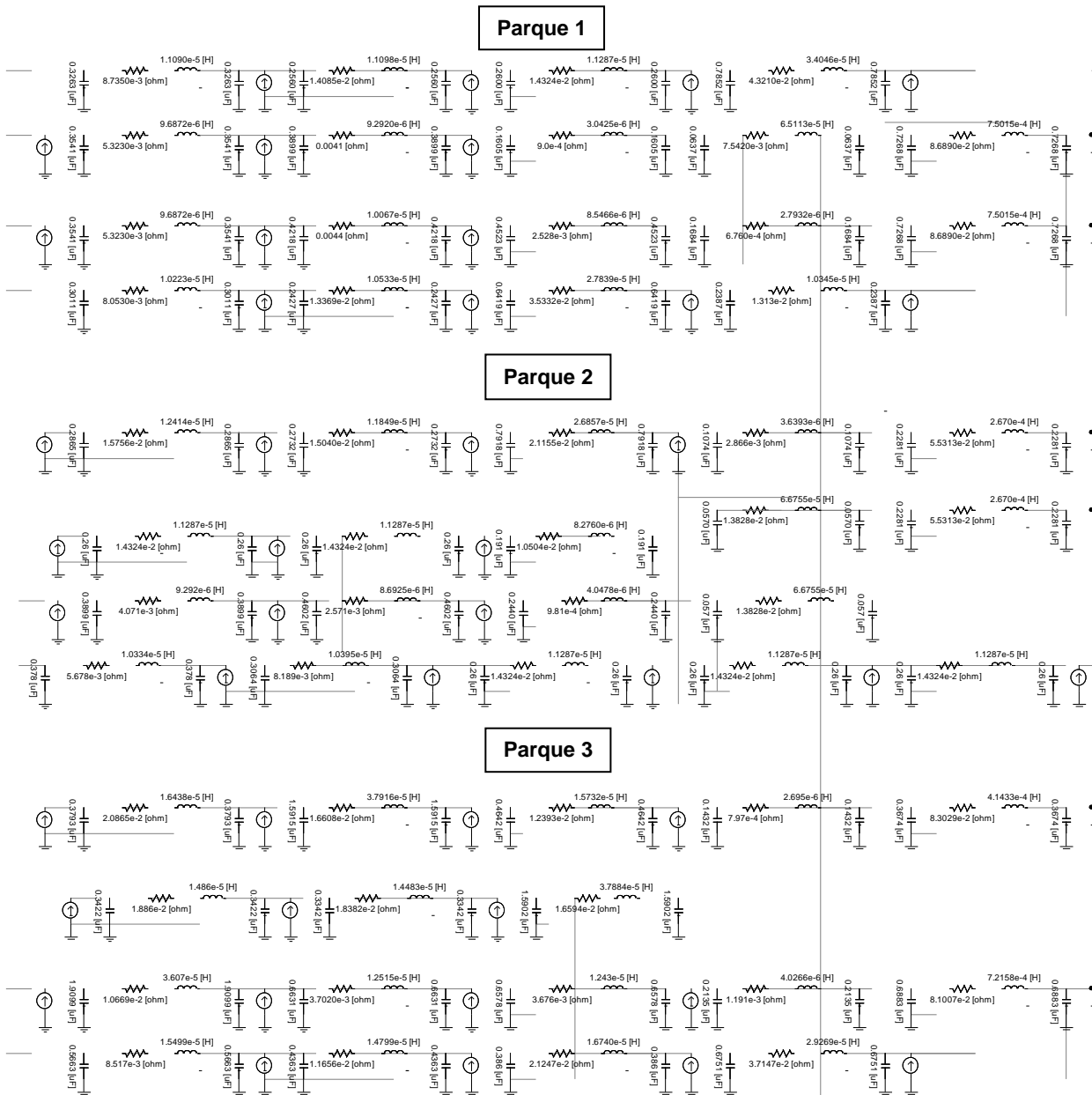


Figura 5: Complexo eólico exemplo modelado no PSCAD (Parte 2 – Ramal 1 composto pelos Parques 1, 2 e 3)

Tabela 1: Dados dos parâmetros das grandezas e dispositivos não indicados nas Figuras 2 até 6

V_SIN (conforme [2])	0,02 pu (RMS)	0 graus
Corrente Aerogerador (conforme [2])	1,6015e-4 pu (RMS)	0 graus
Controle PI do caso mais crítico de [2] (ativado pelo Sinal IR3)	Ganho proporcional = 0,1	Constante de Tempo Integral = 0,04 s
Sinal IR3	Opera a partir de 0,0585 s até 0,15 s	Desligada no resto do tempo
Controle PI do caso em ressonância (ativado pelo Sinal IR5)	Ganho proporcional = 0,01	Constante de Tempo Integral = 0,15 s
Sinal IR5	Opera a partir de 0,2405 s até 0,33 s	Desligada no resto do tempo
Chave ch1 da impedância do SIN para o caso mais crítico de [2]	Fechada: de 0 até 0,18 s	Aberta: a partir de 0,18 s até 0,33 s
Chave ch2 da impedância do SIN para o caso em ressonância	Aberta: de 0 até 0,18 s	Fechada: a partir de 0,18 s até 0,33 s

É importante destacar que a qualidade dos resultados das simulações seria mantida se no lugar de utilizar o modelo dos inversores dos aerogeradores por fontes de corrente (sistema exemplo) fosse utilizado o modelo por fontes de tensão (VSC com controle PWM).

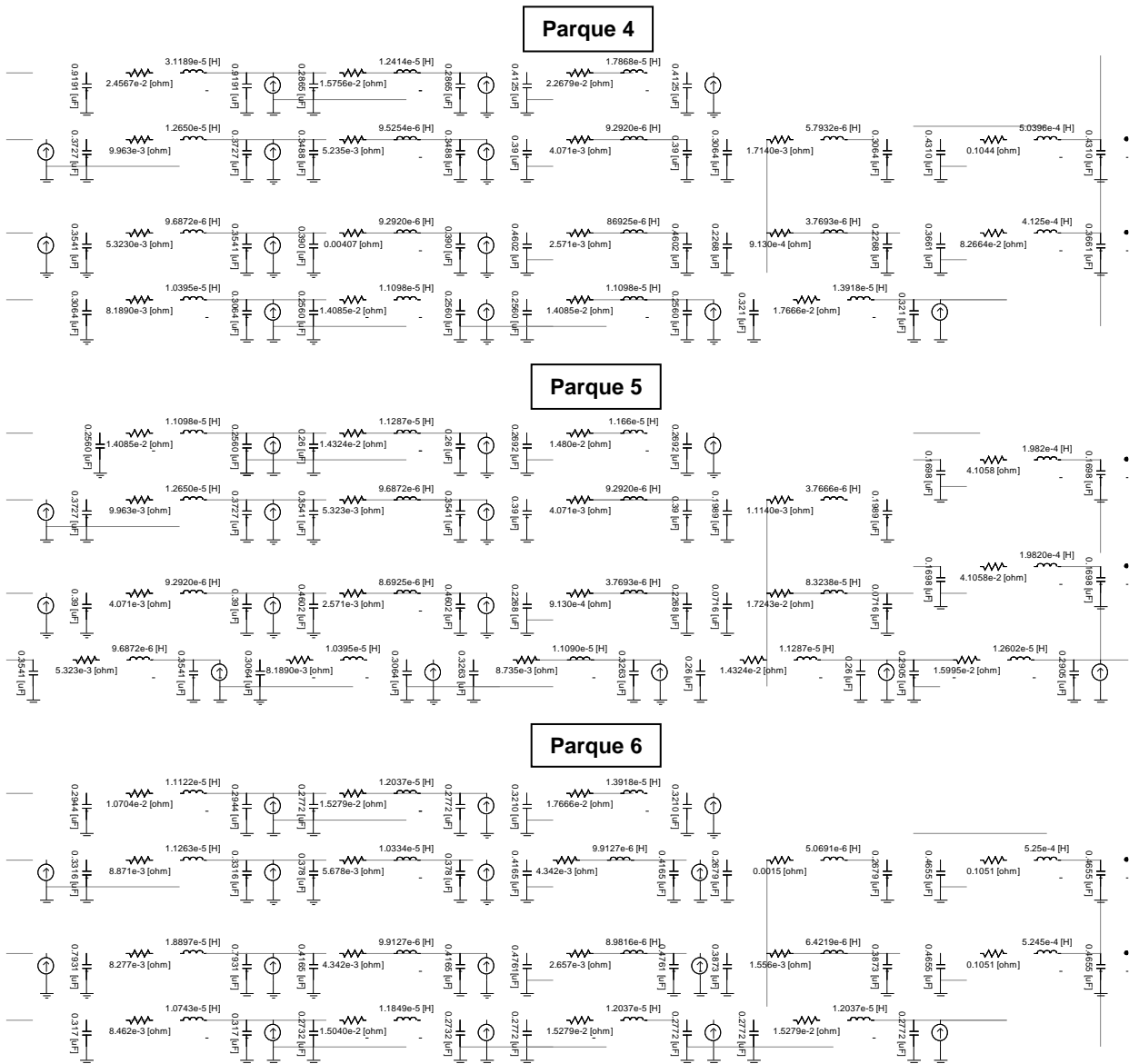


Figura 6: Complexo eólico exemplo modelado no PSCAD (Parte 3 – Ramal 2 composto pelos Parques 4, 5 e 6)

Os gráficos a seguir mostram as curvas obtidas apenas do Ramal 1, pois as análises de ambos os ramos são análogas. Para viabilizar a comparação das componentes da Equação (1), a mesma teve que ser implementada no domínio do tempo (DT) através do sistema de blocos indicado na Figura 7. Note que os valores 0,05365 (inverso do módulo de Z_N) e $89,94^\circ$ (ângulo de Z_N utilizado pelo bloco defasador da Figura 7) foram retirados de [2]. Deve-se observar que para realizar as comparações, todas as grandezas de pico analisadas foram divididas por $\sqrt{2}$.

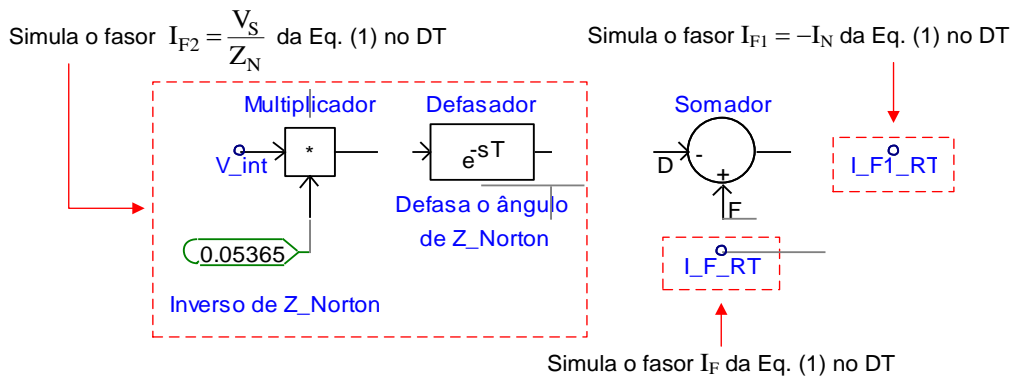


Figura 7: Simulação dos fasores da Equação (1) no DT

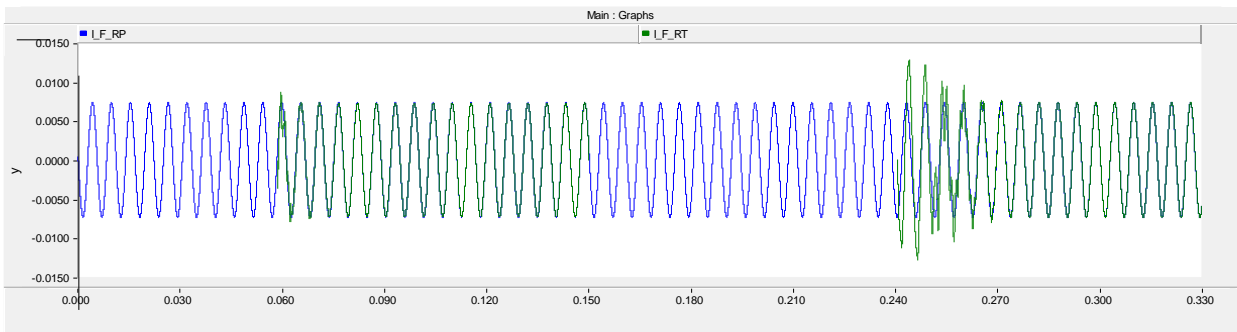


Figura 8: Corrente injetada pelo filtro: modelos de RP (I_{F_RP}) e de RT (I_{F_RT})

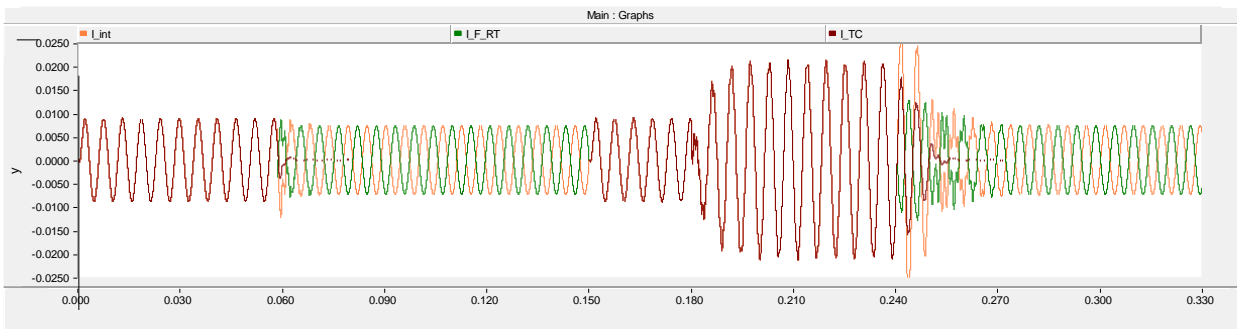


Figura 9: Correntes na saída do Ramal 1 (I_{int}), no transformador (I_{TC}) e injetada pelo filtro (I_{F_RT})

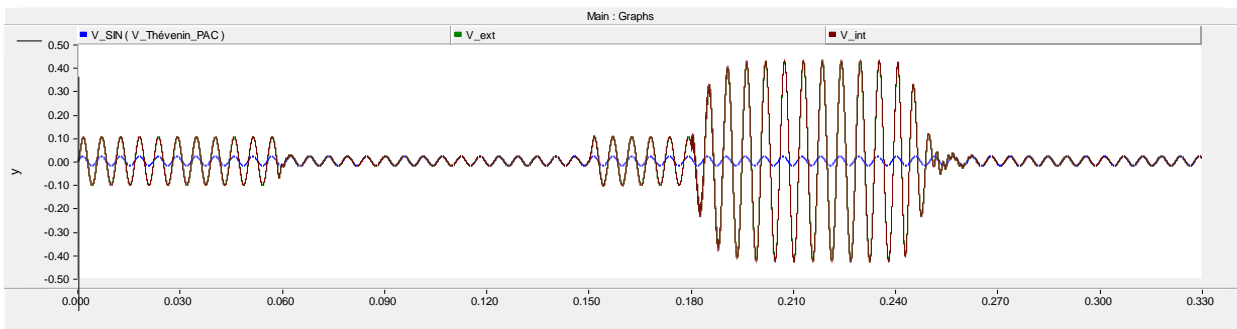


Figura 10: Tensões de Thévenin do SIN (V_{SIN}), no PAC (V_{ext}) e na barra coletora (V_{int})

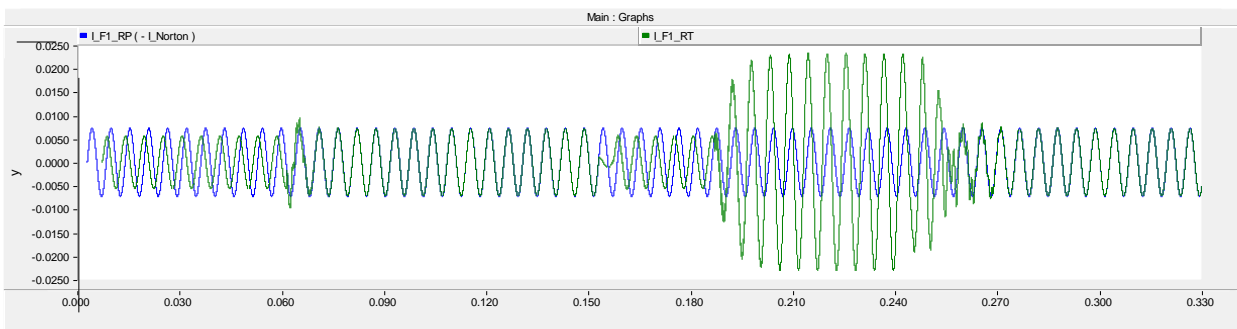


Figura 11: 1ª parcela de (1) ($-I_N$): modelos de RP (I_{F1_RP}) e de RT (I_{F1_RT})

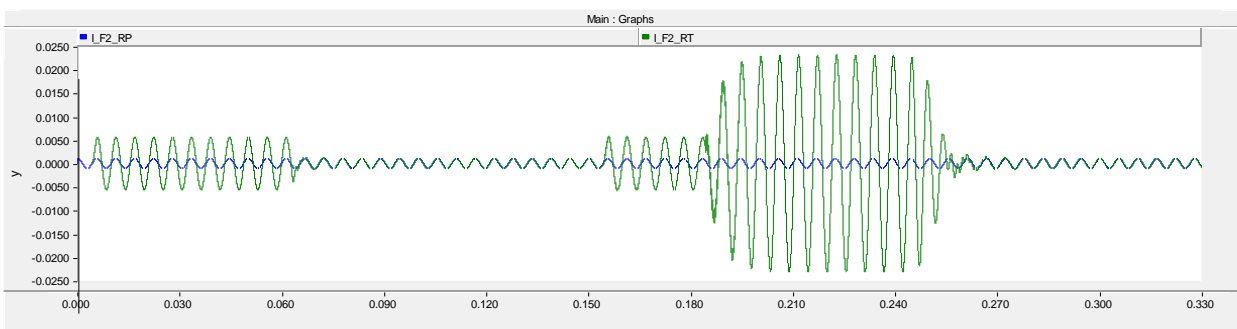


Figura 12: 2ª parcela de (1) (V_S/Z_N): modelos de RP (I_{F2_RP}) e de RT (I_{F2_RT})

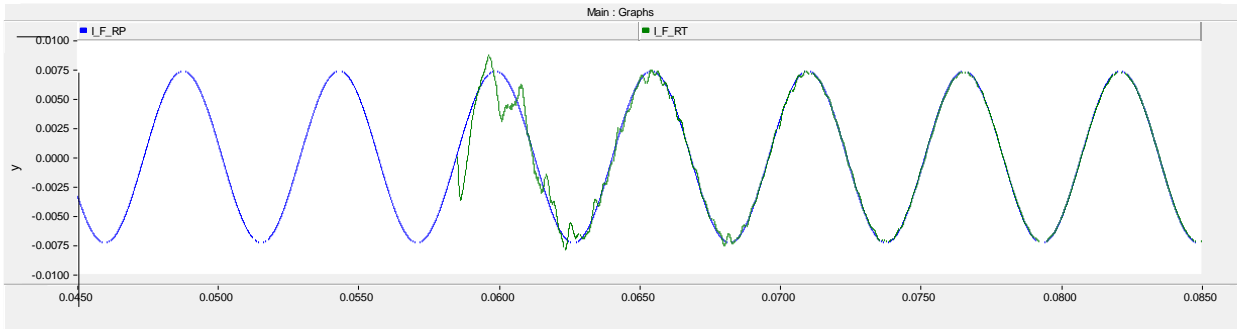


Figura 13: Corrente injetada pelo filtro: modelos de RP (I_{F_RP}) e de RT (I_{F_RT}) - 1ª Ampliação

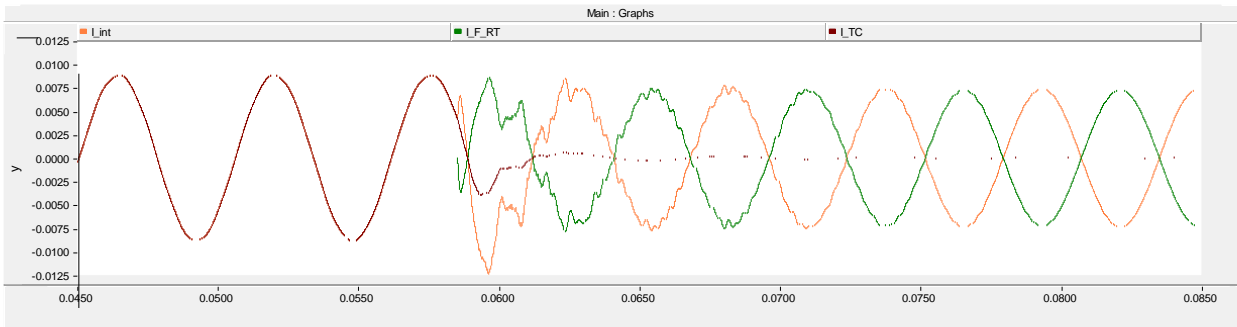


Figura 14: Correntes na saída do Ramal 1 (I_{int}), no trafo (I_{TC}) e injetada pelo filtro (I_{F_RT}) - 1ª Ampliação

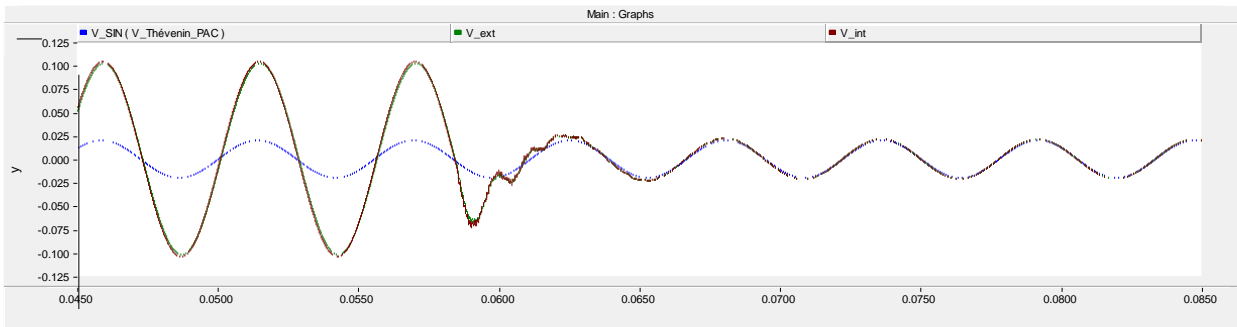


Figura 15: Tensões de Thévenin do SIN (V_{SIN}), no PAC (V_{ext}) e na barra coletora (V_{int}) - 1ª Ampliação

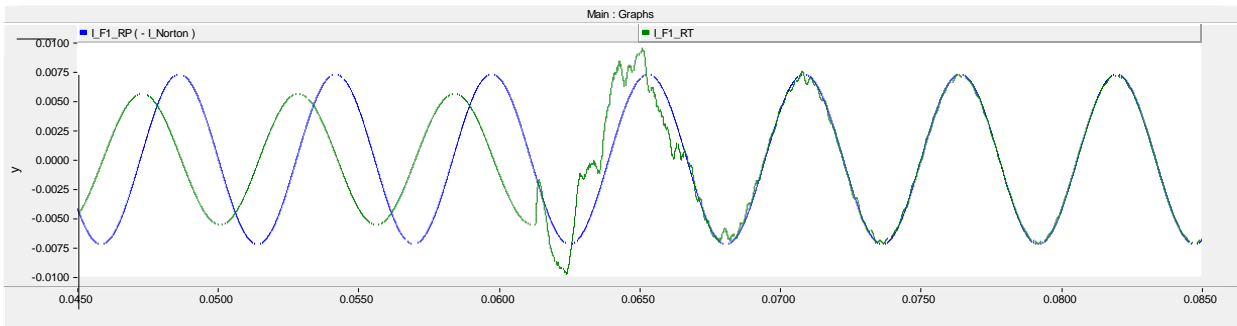


Figura 16: 1ª parcela de (1) ($-I_N$): modelos de RP (I_{F1_RP}) e de RT (I_{F1_RT}) - 1ª Ampliação

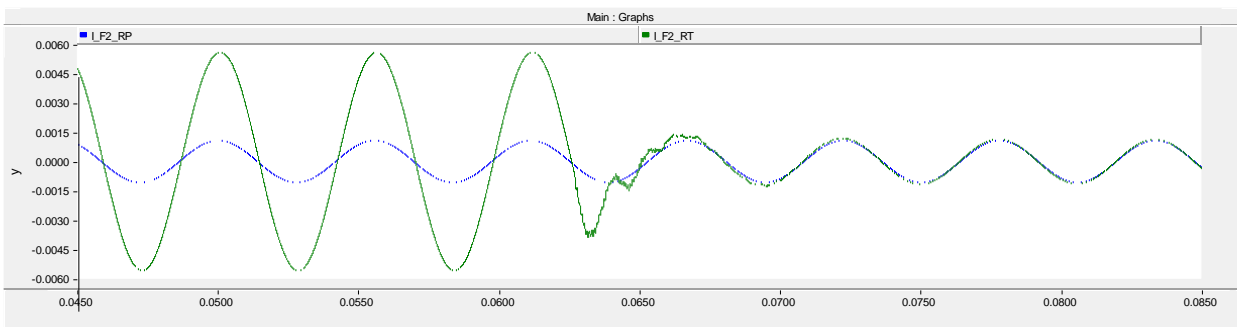


Figura 17: 2ª parcela de (1) (V_S/Z_N): modelos de RP (I_{F2_RP}) e de RT (I_{F2_RT}) - 1ª Ampliação

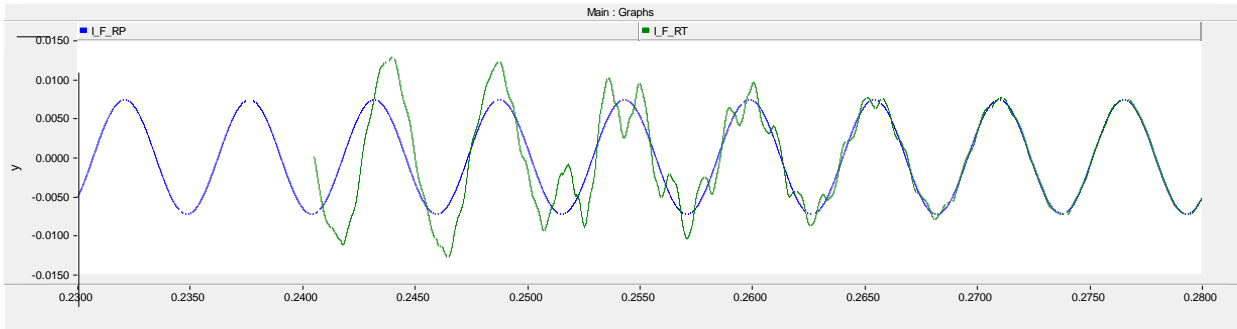


Figura 18: Corrente injetada pelo filtro: modelos de RP (I_{F_RP}) e de RT (I_{F_RT}) - 2ª Ampliação

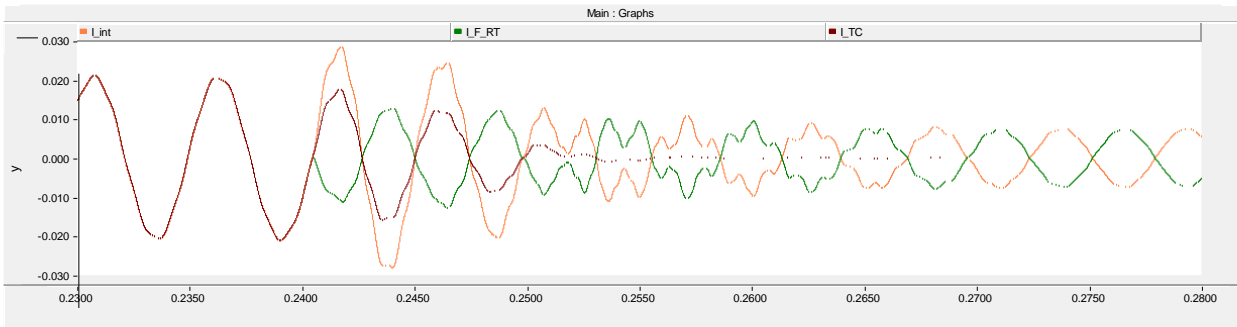


Figura 19: Correntes na saída do Ramal 1 (I_{int}), no trafo (I_{TC}) e injetada pelo filtro (I_{F_RT}) - 2ª Ampliação

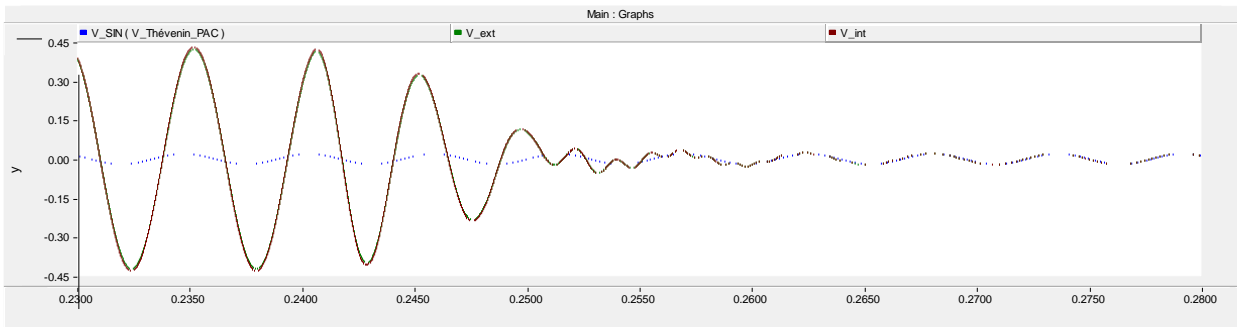


Figura 20: Tensões de Thévenin do SIN (V_{SIN}), no PAC (V_{ext}) e na barra coletora (V_{int}) - 2ª Ampliação

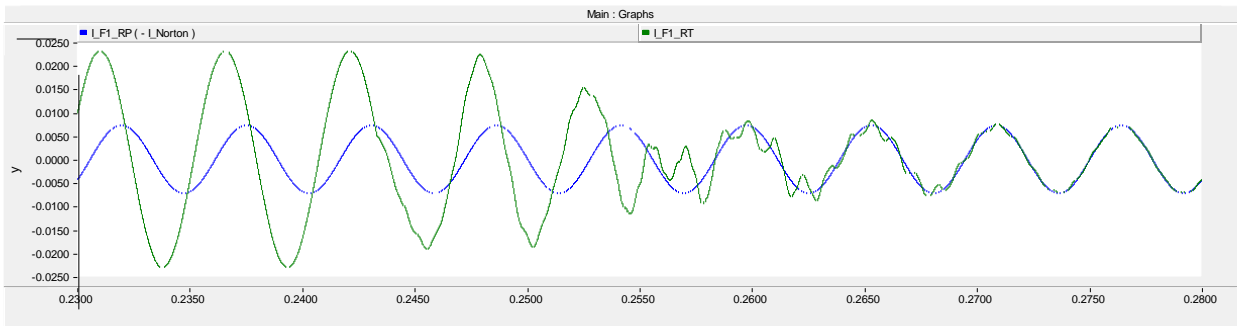


Figura 21: 1ª parcela de (1) ($-I_N$): modelos de RP (I_{F1_RP}) e de RT (I_{F1_RT}) - 2ª Ampliação

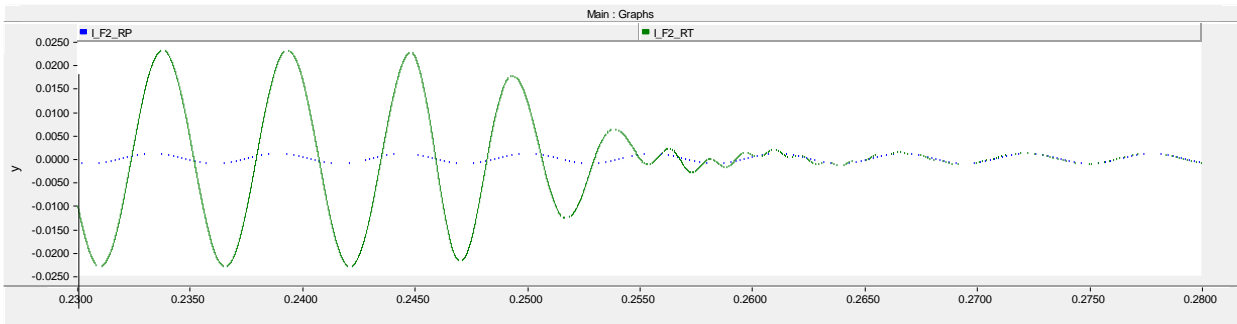


Figura 22: 2ª parcela de (1) (V_S/Z_N): modelos de RP (I_{F2_RP}) e de RT (I_{F2_RT}) - 2ª Ampliação

Da Figura 8 até a Figura 12 são mostrados os resultados da simulação do CE conectado ao SIN (ver Figura 2), para todo o domínio de análise, ou seja, desde 0 s até 0,33 s. Estas mesmas curvas foram ampliadas nas regiões próximas dos instantes iniciais de operação dos filtros para ambos os cenários de análise, isto é, para o caso mais crítico de [2] e para o caso ressonante, conforme mostrado da Figura 13 até a Figura 17 (de 0,045 s até 0,085 s - Ampliação 1) e da Figura 18 até a Figura 22 (de 0,23 s até 0,28 s - Ampliação 2), respectivamente.

Na Figura 8, Figura 13 e Figura 18 se observa que quando os filtros ativos são ligados (atuação dos sinais IR3 e IR5 da Tabela 1) a corrente I_{F_RT} rapidamente assume o mesmo valor da respectiva corrente do modelo de RP. Portanto, conforme em [2], o princípio de funcionamento do filtro ativo ideal foi atingido, que consiste em injetar uma corrente harmônica que anule a corrente monitorada pelo filtro (corrente do transformador acoplador). A eliminação desta corrente, lida pelo respectivo TC (I_{TC}), é notoriamente vista na Figura 9, Figura 14 e Figura 19. Como esperado, as curvas destas figuras também mostram o cumprimento da primeira lei de Kirchhoff ($I_{int} + I_{F_RT} = I_{TC} = 0$) no nó do Ramal 1 (Figura 2). Anular esta corrente implica em zerar a diferença de potencial entre as barras terminais do transformador acoplador, ou seja, isolar eletricamente os sistemas vistos por estas barras. Note que esta diferença de potencial é muito pequena (V_{ext} e V_{int} são visualmente coincidentes em todo o tempo avaliado), de modo que este isolamento só é percebido quando as tensões destes terminais atingem o mesmo valor da tensão V_{SIN} (Figura 2). Portanto, foi comprovado que o filtro ativo forçou o isolamento dos sistemas envolvidos. Com os sistemas isolados, é possível observar se as parcelas fasoriais da Equação (1), simuladas no DT pelo modelo de RT do filtro ativo (ver Figura 7), são atendidas. Como previsto pelo modelo de RP, se observa que na Figura 11, Figura 16 e Figura 21, a componente I_{F1_RT} atinge o mesmo valor do modelo de RP (I_{F1_RP}), que é igual ao negativo da corrente de Norton ($-I_N$) do Ramal 1. Para a outra componente, isto é, I_{F2_RT} , mostrada na Figura 12, Figura 17 e Figura 22, também se vê que esta curva assume o respectivo valor do modelo de RP (I_{F2_RP}), que é igual a V_S/Z_N . Ressalta-se que mesmo na condição extrema do cenário de ressonância, as simulações no PSCAD comprovaram a Equação (1) que descreve o comportamento harmônico dos filtros ativos no regime permanente. Ademais destaca-se que o isolamento dos ramais imposto pelos filtros ativos e a obtenção de suas correntes de Norton, possibilitarão a identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas no PAC [3]. Um resumo dos resultados das simulações, comparando-se os modelos de RP e RT dos filtros ativos, encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2: Comparação dos resultados no Ramal 1 para o 3º harmônico devidos aos modelos de RP e de RT

Valores de RP importados de [2]		Valores no final do RT calculados pelo PSCAD		
Variável	Caso mais Crítico	Variável	Caso mais Crítico	Caso Ressonante
V_{SIN}	0,020	V_{int} e V_{ext}	0,02031	0,02049
I_{F1_RP}	0,007248	I_{F1_RT}	0,007216	0,007210
I_{F2_RP}	0,001073	I_{F2_RT}	0,001090	0,001102
I_{F_RP}	0,007327	I_{F_RT}	0,007306	0,007340

Os resultados desta tabela, além de ratificar a efetividade do modelo de RP, evidenciam que o desempenho dos filtros ativos independe da impedância do SIN, pois se observa que para ambas as representações da impedância do SIN (caso mais crítico de [2] e caso ressonante), os resultados são praticamente os mesmos.

5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados da simulação no PSCAD mostraram que o desempenho do modelo de RT de filtros ativos, em regime permanente, é idêntico ao do modelo de RP proposto em [2], comprovando-se, assim, a Equação (1). Consequentemente, os filtros ativos poderão ser utilizados em uma série de aplicações promissoras relacionadas à mitigação de harmônicos e à inédita identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas no PAC [3]. Dentre as vantagens das aplicações dos filtros ativos na mitigação de harmônicos, que seriam impraticáveis pelos convencionais filtros passivos, cita-se, a flexibilidade na filtragem, a impossibilidade de geração de ressonâncias (paralelas) e a blindagem da nova instalação. Também, em muitos casos, os filtros ativos demandarão uma reduzida potência para atender os limites especificados, significando que os custos destes filtros serão muito menores que os dos filtros passivos. Desta maneira, os resultados deste trabalho, associados às vantagens do uso de filtros ativos na média tensão, sinalizam a necessidade de comprovar o desempenho destes equipamentos em sistemas reais.

6.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS NT 009/2016 – REV.01 “Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à Rede Básica para parques eólicos, solares e consumidores livres”, Abril de 2016.
- [2] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Octávio Augusto da Cunha e Renato Campos Amaral “Metodologia para Redução de Tensões Harmônicas em Redes Elétricas Utilizando Filtros Ativos na Média Tensão”, XXIII SNPTTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz de Iguaçu – PR, de 18 a 22 de Outubro de 2015.
- [3] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Octávio Augusto da Cunha e Renato Campos Amaral “Metodologia Baseada em Medições e no uso de Filtros Ativos para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Relativas à Conexão de Novas Instalações ao SIN”, XXIV SNPTTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, a ser publicado em 22 a 25 de Outubro de 2017.