

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LEONARDO RYUDI HYAKUTAKE

**ANÁLISE DE MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO ATIVOS PARA SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

**Ilha Solteira
2022**

LEONARDO RYUDI HYAKUTAKE

**ANÁLISE DE MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO ATIVOS PARA SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nome do orientador

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

H992a Hyakutake, Leonardo Ryudi.
Análise de métodos anti-ilhamento ativos para sistemas fotovoltaicos /
Leonardo Ryudi Hyakutake. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
81 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Guilherme de Azevedo e Melo
Inclui bibliografia

1. Métodos anti-ilhamento Ativos. 2. Sistema fotovoltaico . 3. Sistema de
geração distribuída . 4. Ilhamento.

Certificado de aprovação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dezessete dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *Leonardo Ryudi Hyakutake*, matriculado sob o nº 141052384, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo*, *Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas* e o *Dr. Rodrigo Alessandro Nunes De Oliveira*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**ANÁLISE DE MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO ATIVOS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**" obtendo a nota 8,0 (oito) e conceito aprovado.

Guilherme de Azevedo e
Melo

Assinado de forma digital por Guilherme de Azevedo e Melo
DSE no e-Governo do Estado de São Paulo, no e-Cadastro de Engenharia de
Bacharelado e no CDEB, em 17/02/2022 às 10:10:00.
Dados: 2022.02.17 09:10:10.1521.62388

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo Melo

- orientador -

Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas

- Membro da Banca -

Leonardo Ryudi Hyakutake

Leonardo Ryudi Hyakutake

- discente -

Dr. Rodrigo Alessandro Nunes De Oliveira

- Membro da Banca -

RESUMO

A ampliação dos sistemas de geração distribuída no país traz alguns problemas que devem ser sanados e dentre eles, um de suma importância é o ilhamento. Por motivo de segurança, os sistemas de geração distribuída devem detectar o ilhamento e interromper o fornecimento de energia para a rede elétrica. Os métodos de detecção de ilhamento, denominados métodos anti-ilhamento, são divididos em dois grupos, sendo os métodos passivos compostos por observação e comparação de parâmetros normatizados, e os métodos ativos, os quais atuam no controle do inversor para gerar algum distúrbio para deslocar o equilíbrio de potência do sistema formado por inversor e carga. Tal equilíbrio pode levar o inversor a operar ilhado, mesmo com a rede de distribuição de energia desenergizada. No sentido de entender a metodologia dos métodos ativos de anti-ilhamento, neste trabalho são estudados os desempenhos de quatro destes métodos, com modelos feitos no ambiente Simulink, a partir de um inversor monofásico, utilizando como fonte a energia solar fotovoltaica. A avaliação do desempenho é feita a partir das zonas de não-deteção (ZND) de cada método anti-ilhamento. Os parâmetros escolhidos para avaliar as ZND foram o fator de qualidade da carga e frequência de ressonância ($Q_f \times f_0$). Os modelos dos métodos anti-ilhamento são executados para diferentes condições de carga RLC, utilizando diferentes valores para Q_f e f_0 , escolhendo pontos fora, dentro e sobre a fronteira da ZND, com o intuito de observar as zonas de não detecção de cada método. Os resultados dos testes são dados por meios de figuras que mostram a mudança de frequência após desconexão da rede e comparando os resultados dos quatro métodos analisados, aqueles que utilizam realimentação positiva mostram ser mais eficientes, pois possuem menores ZND utilizando menores distúrbios.

Palavras-chave: anti-ilhamento; geração distribuída; ilhamento; energia fotovoltaica.

ABSTRACT

The expansion of distributed generation systems in the country brings some problems that must be solve and among them, one of paramount importance is the islanding. For safety reasons, distributed generation systems must detect the islanding and interrupt the power supply to the electricity grid. The methods of islanding detection, called anti-islanding methods, are divided into two groups, and passive methods, which are composed of observation and comparison of standardized parameters. And the active methods, in the other group, act in the control of the inverter to generate some disturbance to displace the power balance of the system formed by inverter and load. Such a balance can led the inverter to operate islanded, even with the power distribution network de-energized. To understand the methodology of active anti-islanding methods, in this paper the performances of four of these methods are studied, with models made in the Simulink, from a single-phase inverter, using photovoltaic solar energy as a source. The performance evaluation is made from the non-detection zones (NDZ) of each anti-islanding method. The parameters chosen to evaluate the NDZ were the load quality factor and resonance frequency ($Q_f \times f_0$). The models of the anti-islanding methods run for different RLC load conditions, using different values for Q_f and f_0 , choosing points outside, inside and on the boundary of the NDZ, to observe the non-detection zones of each method. The test results are given by means of figures that show the frequency change after disconnection from the network and comparing the results of the four analyzed methods, those that use positive feedback show to be more efficient, as they have smaller NDZ using smaller disturbances.

Keywords: anti-islanding; distributed generation; islanding; photovoltaic energy

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	9
2.1	SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	9
2.2	SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	10
2.3	ILHAMENTO	11
2.4	MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO	12
2.4.1	Métodos locais passivos	13
2.4.2	Métodos locais ativos	16
2.4.3	Zona de Não Detecção (ZND)	23
3	MODELO DE SIMULAÇÃO	34
3.1	INVERSOR MONOFÁSICO	35
3.2	MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO AVALIADOS	42
3.2.1	Método Desvio Ativo de Frequência	42
3.2.2	Método Desvio ativo de frequência com realimentação positiva	45
3.2.3	Método Desvio de Frequência no modo Escorregamento	47
3.2.4	Método Injeção de Reativo	49
3.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	51
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	52
4.1	RESULTADOS DO MÉTODO AFD	52
4.2	RESULTADOS DO MÉTODO SFS	56
4.3	RESULTADOS DO MÉTODO SMS	62
4.4	RESULTADOS DO MÉTODO INJEÇÃO DE REATIVO	68
4.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	72
5	CONCLUSÃO	73

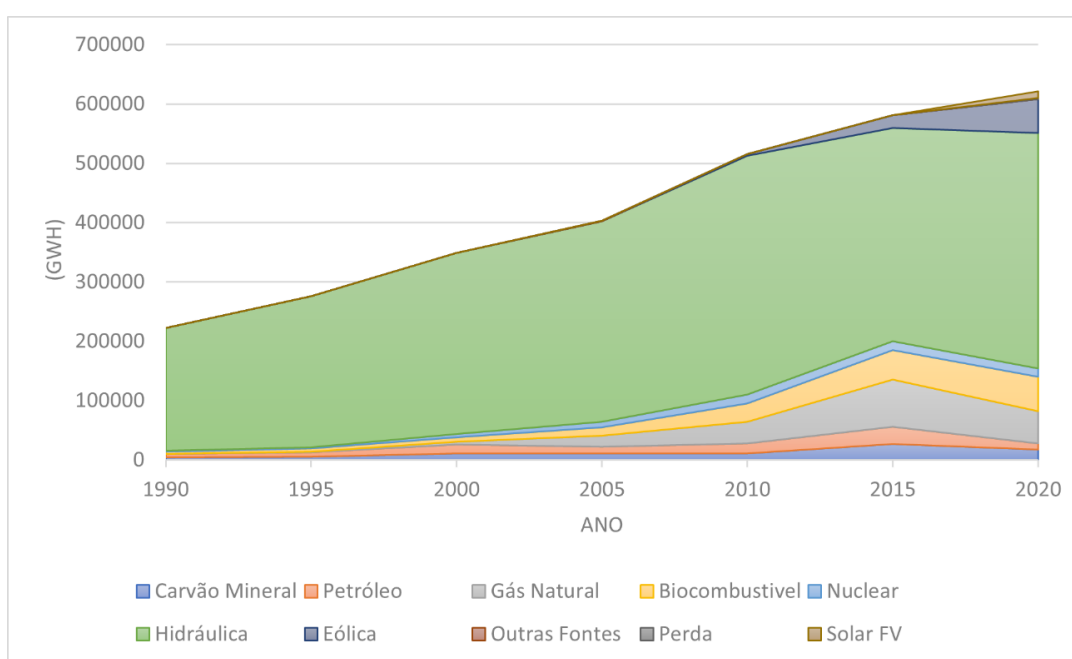
REFERÊNCIAS	74
-------------------	----

APÊNDICE A – Código fonte utilizados	76
--	----

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a grande parte da geração de energia elétrica vem de fontes renováveis de energia, isso porque o Brasil possui um grande potencial hídrico que possibilita produzir a maior parte de sua energia elétrica por meio de hidrelétricas. Na Figura 1 pode ser observada a geração de energia elétrica brasileira para diferentes fontes de energia.

Figura 1 - Geração de energia elétrica brasileira para diferentes fontes de energia de 1990 a 2020

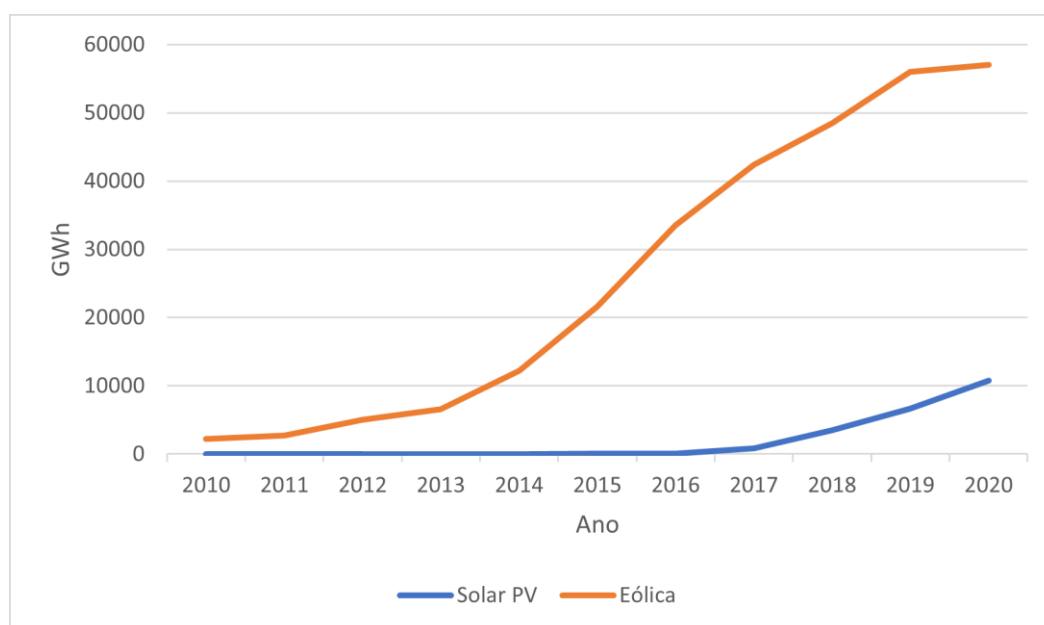


Fonte: (IAE, 2021)

Devido à alta concentração em hidroelétricas, o sistema de energia elétrico no Brasil é caracterizado pelo uso de geradores centralizados, que estão distantes dos grandes centros urbanos. Uma forma de diminuir a dependência que os grandes centros urbanos têm dos sistemas de geração centralizada é a inclusão de sistema de geração distribuída (SGD) no sistema de energia elétrico brasileiro. O SGD refere-se a pequenas unidades de geração de energia elétrica, próximas ou no local de consumo, para atender a demanda dos usuários finais, podendo aparecer conectado ou não à rede de distribuição.

No Brasil, a busca por diversificar a fonte energética do país tem impulsionado o aumento da quantidade de geração eólica e fotovoltaica a cada ano, porém ainda representam um percentual muito pequeno da energia produzida quando comparada com as hidrelétricas. Na Figura 2 pode ser observado o crescimento da quantidade de energia eólica e fotovoltaica geradas no país.

Figura 2 - Geração de energia elétrica fotovoltaica e eólica no Brasil de 2010 a 2020



Fonte: (IAE, 2021)

A ampliação dos SGD's traz alguns problemas que devem ser sanados, um desses problemas é o ilhamento. O ilhamento é uma situação em que parte do sistema de distribuição permanece energizado por um SGD, mesmo quando se encontra eletricamente isolado do resto do sistema. A não detecção de um ilhamento, ou a detecção e a desconexão tardia do SGD podem causar problemas de segurança, podendo até oferecer risco à vida dos funcionários da concessionária. Nessa questão, o funcionário pode achar que a rede elétrica não está energizada e ser eletrocutado na referida rede ilhada. Por esse motivo, os SGD's devem detectar o ilhamento e interromper o fornecimento de energia para a rede elétrica. A detecção de ilhamento é alcançada por meio de métodos anti-ilhamento que utilizam algum parâmetro do sistema da rede elétrica para determinar a desconexão do SGD.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

No Brasil, dentre as diversas fontes alternativas de energia, utilizadas em sistemas de geração distribuída, a que mais apresenta potencial energético é a solar fotovoltaica. Devido à alta incidência solar no território, os painéis fotovoltaicos conseguem gerar mais energia e consequentemente diminuir o tempo de retorno do investimento (*payback*). Esse tipo de geração de energia possui vantagens como ser proveniente de uma fonte de energia inesgotável, e não possuir restrições geográficas (HONGKAI *et al.*, 2008).

2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O Sistema de Geração Distribuída (SGD) refere-se a pequenas unidades de geração de energia elétrica, próximas ou no local de consumo, para atender a demanda dos usuários finais, podendo aparecer conectado ou não à rede de distribuição. Nesse sistema são encontradas fontes alternativas de energia, tais como, gás natural, hidrogênio, solar, eólica, biomassa etc.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pela Resolução Normativa ANEEL nº482/2012, permitiu que o consumidor brasileiro gerasse sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, atendendo seu próprio consumo e fornecendo o excedente para a rede de distribuição local. Esse excedente de energia injetada na rede torna-se um “crédito de energia”, apesar de não poder ser vendido, pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes com validade de 60 meses (ANEEL, 2012).

Esses estímulos para a adesão da geração distribuída são motivados por potenciais benefícios, tais como econômicos, ambiental, diversidade de matrizes energéticas e a possibilidade de geração de energia elétrica em áreas remotas.

2.2 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Na geração de energia fotovoltaica, a conversão de energia solar para energia elétrica é realizada através de efeito fotovoltaico. Para isso, são utilizadas células fotovoltaicas, constituídas por um material semicondutor, normalmente de silício, ao qual são adicionadas substâncias “dopantes”, possibilitando a conversão da energia, associada à radiação solar, em energia elétrica CC. A tensão gerada por uma célula fotovoltaica é da ordem de 0,6 V, por esse motivo, normalmente as células fotovoltaicas são associadas em série, para obter maiores tensões. O conjunto de células fotovoltaicas dá-se o nome de módulo fotovoltaico. (ALMEIDA, 2012)

É necessário o uso de inversores que convertam a potência, de corrente contínua proveniente dos módulos em corrente alternada, para que seja possível conectá-los à rede elétrica, obedecendo os parâmetros adequados de qualidade de energia (SILVA, 2016). Os inversores modernos possuem alto rendimento, bons algoritmos de rastreador do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*), medidas de segurança para desconexão da rede em condições prejudiciais, mecanismos de anti-ilhamento, medição de parâmetros elétricos, dentre outras funções. (ALMEIDA, 2012)

Os inversores utilizam componentes semicondutores como transistores (MOSFET e IGBT), para efetuar a comutação responsável pela conversão CC para CA. Esses componentes operam em dois estados, ligado ou desligado, logo, é necessário o uso de PWM (Modulação por Largura de Pulso) para obter uma forma de onda senoidal na saída do inversor. O sinal de saída do inversor possui distorções harmônicas, sendo necessário filtros para obter uma onda senoidal pura. (ALMEIDA, 2012)

2.3 ILHAMENTO

Assim como a necessidade de possuir bons algoritmos de MPPT para maximizar a geração de energia elétrica, os inversores devem possuir bons mecanismos de detecção de falhas que garantam a segurança da operação do sistema. Um desses mecanismos é a detecção de ilhamentos.

O ilhamento é uma situação em que parte do sistema de distribuição permanece energizado por um sistema de geração distribuída, mesmo quando se encontra eletricamente isolado do resto do sistema. Na condição de ilhamento o ponto isolado ocorre geralmente em linhas de distribuição de baixa tensão. Entretanto, ela também pode ocorrer em redes de distribuição de alta tensão ou mesmo em linhas de transmissão, quando muitas fontes de geração distribuída estão presentes (SILVA, 2016).

Além disso, o ilhamento pode ser classificado como intencional ou não intencional. O ilhamento intencional ocorre de forma planejada, quando a concessionária mantém parte do sistema elétrico funcionando de forma isolada através de um ou mais geradores distribuídos. Já o ilhamento não intencional geralmente acontece de forma não programada, de modo que o fornecimento de energia elétrica é interrompido por fatores inesperados (SILVA, 2016). De acordo com (BOWER e ROPP, 2002), as causas mais comuns de ilhamento não intencional em sistemas fotovoltaicos são:

- Uma falha que é detectada pela concessionária, e que resulta na abertura de um dispositivo de desconexão, porém não é detectado pelo inversor fotovoltaico ou dispositivos de proteção.
- Abertura acidental da linha de distribuição causado por falha de equipamento.
- Desconexão intencional para serviços na linha de distribuição.
- Falhas humanas.
- Fenômenos naturais.

A não detecção de um ilhamento, ou a detecção e a desconexão tardia de um SGD podem causar problemas de qualidade de energia e segurança.

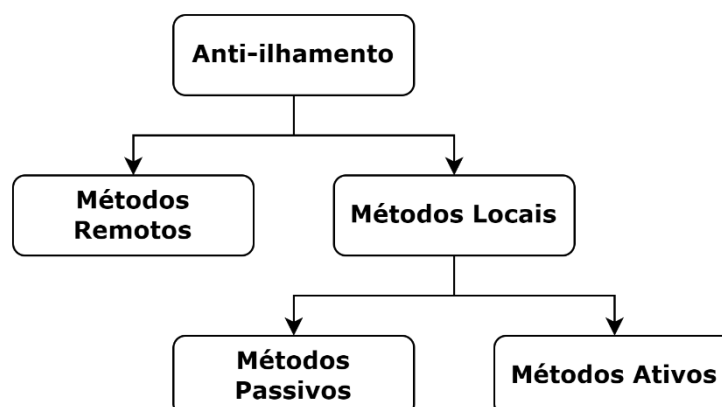
As concessionárias de energia elétrica são responsáveis pela qualidade entregue aos consumidores, porém, durante situações de ilhamento, a concessionária de energia elétrica não consegue controlar as características elétricas só sistema de distribuição, pois a porção ilhada do sistema de distribuição é alimentada somente por geradores distribuídos. Desta forma, essa porção do sistema ilhado pode apresentar níveis de tensão e frequência inadequados durante ilhamentos não intencionais (MARCHESAN, 2016). Além disso, o ilhamento pode criar um perigo para os funcionários que realizam serviços nas linhas, fazendo com que uma linha permaneça energizada enquanto se presume estar desconectada de todas as fontes de energia.

Por esses motivos, a (ANEEL, 2017) estabelece a detecção de ilhamento como uma função de proteção obrigatória. A medida de segurança utilizada para prevenir esse fenômeno é conhecido como proteção anti-ilhamento.

2.4 MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO

Por conta da necessidade da detecção de ilhamento, foram desenvolvidos diversos métodos de detecção de ilhamento. Esses métodos podem ser classificados como remotos e locais, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Classificação dos Métodos Anti-ilhamento



Fonte: Próprio autor.

Os métodos remotos necessitam de comunicação entre a geração distribuída e as centrais de monitoramento da geração de energia elétrica. Quando ocorre uma falha na rede, um sinal de desconexão é enviado para o SGD, avisando do problema e solicitando a desconexão com o ponto de acoplamento comum (PAC). Esses métodos são eficazes porque não apresentam zonas de não detecção (ZND), porém, possuem custo elevado, o que inviabiliza seu emprego para sistemas de geração distribuída de baixas potências, como é o caso dos sistemas fotovoltaicos residenciais. Um dos métodos de comunicação mais utilizados para essa finalidade é o PLC (Power Line Communication) (SAMPAIO, 2013).

Os métodos locais são os métodos que são embutidos no inversor do sistema fotovoltaico e são divididos em dois grupos: Passivos e Ativos. O método passivo se caracteriza por não influenciar o controle de chaveamento do inversor; artifício que é utilizado pelos métodos ativos. Normalmente os dois métodos aplicados em conjunto conseguem detectar situações de ilhamento sem zona de não detecção.

2.4.1 Métodos locais passivos

Os métodos de detecção de ilhamento passivos são baseados no monitoramento da condição de um ou mais parâmetros no ponto de conexão do gerador distribuído com a concessionária. As variáveis que podem ser utilizadas são: frequência, magnitude da tensão, ângulo de fase e alguma harmônica específica ou a taxa de distorção harmônica THD (*Total Harmonic Distortion*). Métodos Passivos são conhecidos por não interferirem na qualidade de energia injetada na rede elétrica, entretanto a maior limitação desse tipo método é a presença de uma grande ZND, não garantindo a detecção de ilhamento sob todas possíveis condições de operação.

Os principais métodos passivos são: detecção de sub/sobre tensão, sub/sobre frequência, detecção de salto de ângulo de fase e detecção de distorção harmônica.

2.4.1.1 Método de detecção de sub/sobre tensão e sub/sobre frequência

Método de detecção de sub/sobre tensão (*Over/Under Voltage* - OUV) e sub/sobre frequência (*Over/Under Frequency* – OUF) baseia-se em monitorar a tensão e a frequência no PAC, comparando-os com limites superior e inferior, estabelecidos por normas. Geralmente esse método é implementado por software e pode ser empregado em gerador distribuído que utilize qualquer fonte de energia. Além de detectar a presença de ilhamento, serve como método de proteção dos inversores fotovoltaicos de sub/sobretensão e frequência da rede.

As vantagens desse método são típicas das técnicas passivas: é simples, possui baixo custo e não degrada a qualidade da energia injetada na rede elétrica. Porém esse método possui uma grande ZND, impedindo a detecção do ilhamento em caso de pequenas variações. O pior caso para a detecção de ilhamento é quando há a condição de equilíbrio da potência ativa e reativa em que não há alteração na amplitude e frequência. Os valores mínimos para potência ativa da rede (ΔP) e potência reativa da rede (ΔQ) são determinados pelas equações (1) e (2) (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

Para OUF:

$$Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{rede}}{f_{min}} \right)^2 \right) \leq \frac{\Delta Q}{P_{FV}} \leq Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{rede}}{f_{max}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Para OUV:

$$\left(\frac{V_{rede}}{V_{max}} \right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_{FV}} \leq \left(\frac{V_{rede}}{V_{min}} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

Onde Q_f é o fator de qualidade, f_{rede} é a frequência da rede elétrica, V_{rede} é a tensão da rede elétrica, P_{FV} é a potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico, e f_{min} e f_{max} são as frequências inferior e superior determinada pela norma. As equações (1) e (2) definem a ZND do método.

2.4.1.2 Método de detecção de salto de fase

Método de detecção de salto de fase (*Phase jump detection* – PJD) baseia-se em monitorar a diferença de fase entre a tensão do terminal do inversor e sua corrente de saída para encontrar um “salto” repentino. Com o funcionamento normal da rede elétrica, o sincronismo entre a corrente de saída e a tensão é feita pela malha de captura de fase (*Phase Locked Loop* - PLL). O PLL é usado para sincronizar a corrente de saída com a tensão fundamental da rede, mantendo o inversor operando com fator de deslocamento unitário. No entanto o seu sincronismo com a tensão no PAC ocorre no instante em que passa por zero, tanto na subida ou na descida. Quando há falha no fornecimento de energia pela rede elétrica, ocorre uma mudança rápida da fase da tensão.

Esse método tem como principal vantagem sua fácil implementação, uma vez que o inversor necessita de qualquer forma de um PLL para a sincronização com a rede elétrica, é necessário apenas adicionar a capacidade de desativar o inversor se o erro de fase detectado entre a corrente e tensão exceder algum limite. Além disso, PJD não afeta a qualidade de energia da saída do inversor e a efetividade desse método não é reduzida quando há paralelismo de vários sistemas de geração distribuídas. (BOWER e ROPP, 2002)

Entretanto, esse método possui algumas desvantagens. Caso a carga seja resistiva, não haverá desvio de fase no ilhamento, logo o ilhamento não é detectado. Outra desvantagem refere-se a dificuldade em determinar limites que forneçam detecção confiável de ilhamento sem que resultem em frequentes desarmes indesejáveis, uma vez que os saltos de fase na tensão da rede ocorrem frequentemente devido, por exemplo, comutação de cargas reativas. (BOWER e ROPP, 2002).

2.4.1.3 Método de detecção de distorção harmônica

Método de detecção de distorção harmônica utiliza o inversor fotovoltaico para monitorar a distorção harmônica total (*Total harmonic distortion* – THD) da tensão no ponto de acoplamento comum e deligar se a THD exceder algum limite. Com o funcionamento adequado da rede elétrica, a sua impedância é baixa e a interação das correntes harmônicas com a impedância da rede elétrica causa pequenas distorções na tensão no ponto de conexão do inversor. Porém, quando o sistema está ilhado, a impedância vista pelo inversor é da carga, que geralmente é mais elevada do que a da rede, fazendo com que a distorção da tensão aumente acima dos limites de THD estabelecidos, permitindo detectar condições de ilhamento.

2.4.2 Métodos locais ativos

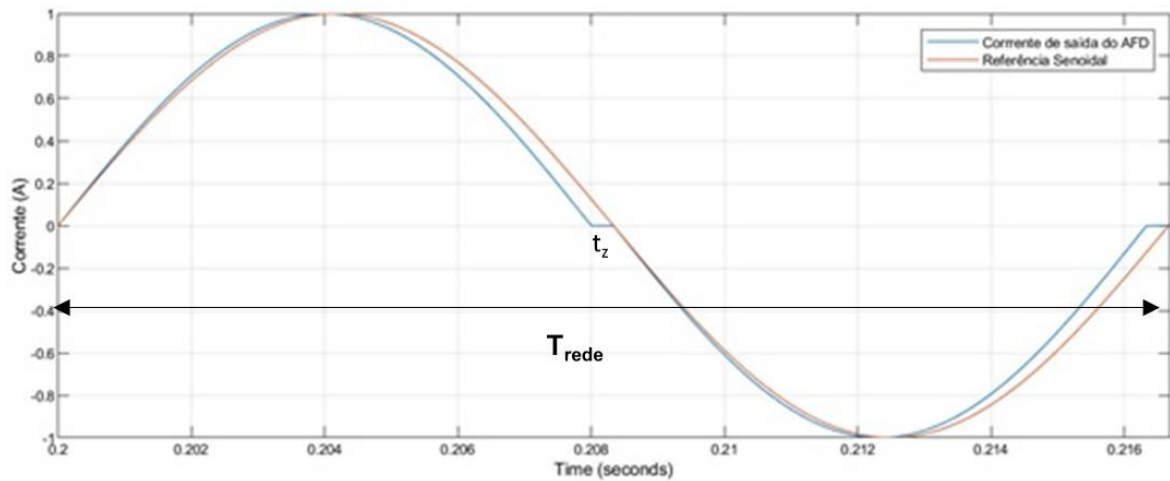
Os métodos locais ativos produzem uma perturbação no PAC a fim de forçar uma mudança de um parâmetro do sistema que possa ser detectado pelos métodos passivos, reduzindo significativamente a ZND. A desvantagem desse tipo de método está relacionada a qualidade de energia entregue à concessionária devido às perturbações injetadas na rede elétrica. Porém as perturbações injetadas acabam sendo desprezíveis e não produzindo impactos significativos.

Neste trabalho, o foco são os métodos locais ativos que têm como objetivo o desvio de frequência. Enquanto a rede estiver presente, a frequência não é alterada, mas quando a rede for desconectada, a perturbação será capaz de desviar a frequência até atingir a proteção OUF. Os métodos visto neste trabalho são: Desvio Ativo de Frequência (*Active Frequency Drift* - AFD), Desvio de Frequência no Modo Escorregamento (*Slip-Mode Frequency* - SMS), Desvio Ativo de Frequência com realimentação positiva (*Sandia Frequency Shift* - SFS) e Injeção de Reativo.

2.4.2.1 Método de desvio ativo em frequência

O método de desvio ativo em frequência (*Active frequency drift– AFD*) consiste em causar pequenas perturbações na corrente de saída do inversor. Um exemplo de tal corrente de saída é mostrado na Figura 4, juntamente com uma corrente senoidal como referência.

Figura 4 - Forma de onda da corrente de saída AFD



Fonte: Próprio autor.

Durante a primeira parte do primeiro meio-ciclo, a corrente de saída é a parcela de uma senoide com uma frequência ligeiramente superior à nominal. A diferença entre a frequência nominal da rede elétrica e a frequência da corrente de saída é definida como δf . Quando a corrente chega a zero, seu valor permanece nulo por t_z até o segundo meio-ciclo começar. Isso se repete para o segundo meio-ciclo, quando corrente de saída é negativa. A fator de corte (c_f) é definido por (3) (ESTÉBANEZ *et al.*, 2011).

$$c_f = \frac{2t_z}{T_{rede}} \quad (3)$$

Onde t_z é o tempo que a corrente é igual a zero e T_{rede} é o período da tensão da rede. O fator de conte c_f define o desvio de frequência δf introduzido à tensão no PAC, e a relação entre eles é dada por (4) (MARTINS DA SILVEIRA, 2020).

$$\delta f = \left(\frac{1}{1-c_f} - 1 \right) f_n \quad (4)$$

Sendo f_n a frequência nominal da rede. Portanto, a frequência de referência f' é a soma da frequência no PAC (f_{PLL}), que é igual a f_n quando conectado à rede, e do desvio de frequência δf , definida por (5) (RESENDE *et al.*, 2019).

$$f' = f_{PLL} + \delta f = \frac{f_n}{1-c_f} \quad (5)$$

A forma de onda da corrente de referência do AFD mostrada na Figura 4 pode ser definida como (RESENDE *et al.*, 2019):

$$i_{ref}(t) = \begin{cases} I \sin(2\pi f' t), & 0 < \omega t < \pi - t_z \\ 0, & \pi - t_z < \omega t < \pi \\ I \sin(2\pi f' t), & \pi < \omega t < 2\pi - t_z \\ 0, & 2\pi - t_z < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

Logo, a fator de corte define a quantidade de desvios introduzidos na frequência f_n . Quanto maior o t_z maior será o c_f , consequentemente, uma maior perturbação introduzida na corrente.

Caso a rede elétrica da concessionária esteja funcionando, não haverá o desvio da frequência, pois a sincronização entre a rede e o inversor é realizado pelo PLL, mas caso a rede não esteja funcionando, a frequência da tensão no ponto de acoplamento comum é determinada pela corrente injetada pelo inversor fotovoltaico e tende a se afastar da frequência nominal da rede, até que a condição de ilhamento seja detectada pelas proteções OUF.

A maior vantagem desse método é a simplicidade, porém sua eficácia é comprometida em caso de múltiplos inversores e para configurações de carga RLC. (RESENDE *et al.*, 2019)

2.4.2.2 Método Desvio ativo de frequência com realimentação positiva

O método Desvio ativo de frequência com realimentação positiva (*Sandia Frequency Shift - SFS*) melhora o desempenho do método AFD adicionando realimentação positiva e, assim, a zona de não detecção do SFS é significativamente menor se comparado com o método de desvio ativo de frequência. A lógica da realimentação positiva nesse método consiste no monitoramento da frequência no PAC para identificar variações neste parâmetro. Ao registrar um aumento ou diminuição da frequência monitorada, o algoritmo aumentará ou diminuirá a referência de potência para intensificar ainda mais essa variação, com o objetivo de acelerar o afastamento da frequência da faixa aceitável. Diferente do método AFD, a fator de corte é variado de acordo com a variação de frequência medida, como definido por (7) (ESTÉBANEZ *et al.*, 2011).

$$cf = cf_0 + K_{SFS}(f_{PLL} - f_n) \quad (7)$$

Sendo:

cf_0 : Fator de corte inicial;

f_{PLL} : Frequências da tensão da rede estimada pelo PLL no PAC;

f_n : Frequência nominal da rede;

K_{SFS} : Ganho da realimentação positiva.

O desempenho do método SFS está diretamente relacionado com os valores do fator de corte inicial cf_0 e do ganho K_{SFS} . Ganhos elevados permitem obter ZND pequenas, mas resultam na deterioração da qualidade de energia (SILVA, 2016). De acordo com (ZEINELDIN e KENNEDY, 2009), pode-se obter o valor de K_{SFS} de tal modo que seja eliminada a ZND para um determinado valor de Q_f , definido por (8).

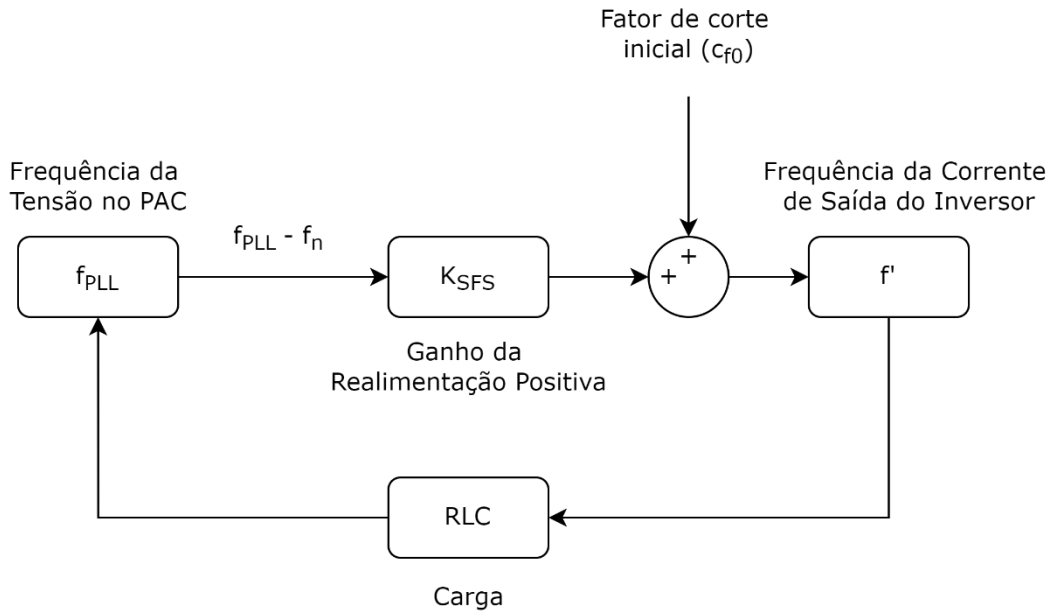
$$K_{SFS} > \frac{4Q_f}{\pi f_0} \quad (8)$$

Quando conectado à rede elétrica, pequenas mudanças de frequência são detectadas e o método tenta aumentar a mudança na frequência, mas a estabilidade da rede impede qualquer mudança.

Da mesma forma do método AFD, o desvio de frequência δf e a frequência f' do método SFS são definidos pelas equações (4) e (5), respectivamente. A forma de onda da corrente de saída do inversor é semelhante da Figura 4.

Um diagrama esquemático do SFS é apresentado na Figura 5. Quando o gerador estiver ilhado atendendo uma carga local, a frequência da tensão será determinada pela resposta da carga à corrente, cuja frequência é resultante do fator cf . Como o fator cf depende do próprio erro da diferença entre a frequência da tensão medida no PAC e a frequência nominal, o laço de realimentação se fecha (RICCIARDI, 2010).

Figura 5 – Diagrama esquemático do SFS



Fonte: Adaptado de (RICCIARDI, 2010)

2.4.2.3 Método Desvio de Frequência no modo Escorregamento

O método do Desvio de Frequência no modo Escorregamento (*Slip-Mode Frequency Shift – SMS*) utiliza uma realimentação positivo que é aplicado à fase da tensão do PAC para desestabilizar o inversor, alterando a frequência. A curva de fase da carga é projetada de modo que a fase do inversor aumente mais rápido do que a fase da carga RLC. Se a rede elétrica for desarmada e a frequência da tensão do PAC estiver distorcida, a curva de fase do inversor aumenta o erro de fase e consequentemente causa instabilidade na frequência. A corrente de referência i_{ref} e a fase para esse método SMS (θ_{SMS}) são definidas por (9) e (10) (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

$$i_{ref} = \sqrt{2} * I * \sin(2\pi ft + \theta_{SMS}) \quad (9)$$

$$\theta_{SMS} = \theta_{max} * \sin\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{f_{PLL} - f}{f_{max} - f}\right] \quad (10)$$

Onde f_{max} é a frequência em que ocorre o deslocamento de fase máximo θ_{max} . Para esse método é possível eliminar a ZND para um dado fator de qualidade Q_f escolhendo f_{max} e θ_{max} que satisfaçam a condição da equação (11) (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

$$\frac{\theta_{max}}{f_{max}-f} \geq \frac{12Q_f}{\pi^2} \quad (11)$$

2.4.2.4 Método de Injeção de Reativo

O método de Injeção de Reativo busca dificultar o equilíbrio entre a saída do inversor com carga local, através do descasamento da potência reativa entre os dois, causado pela introdução de potência reativa. Com a rede elétrica conectada ao SGD, a tensão do PAC, V_{PAC} , é igual a tensão da rede, V_{rede} . A potência ativa, P_{carga} , e a potência reativa, Q_{carga} , da carga RLC são calculada por (12) e (13) (LI e BALOG, 2014).

$$P_{carga} = \frac{V_{PAC}^2}{R} \quad (12)$$

$$Q_{carga} = V_{rede}^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = P_{carga} Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \quad (13)$$

Onde ω é a frequência angular da V_{PAC} . Na condição de ilhamento, P_{carga} e Q_{carga} são iguais às potências ativas e reativas, P_{FV} e Q_{FV} , fornecidas pelo inversor. Logo após o ilhamento ocorrer, a frequência da tensão no PAC torna-se igual à frequência ressonante da carga. A potência reativa da carga é definida por (14) (LI e BALOG, 2014).

$$Q_{carga} = Q_{FV} = P_{FV} * Q_f \left(\frac{f_0}{f_i} - \frac{f_i}{f_0} \right) \quad (14)$$

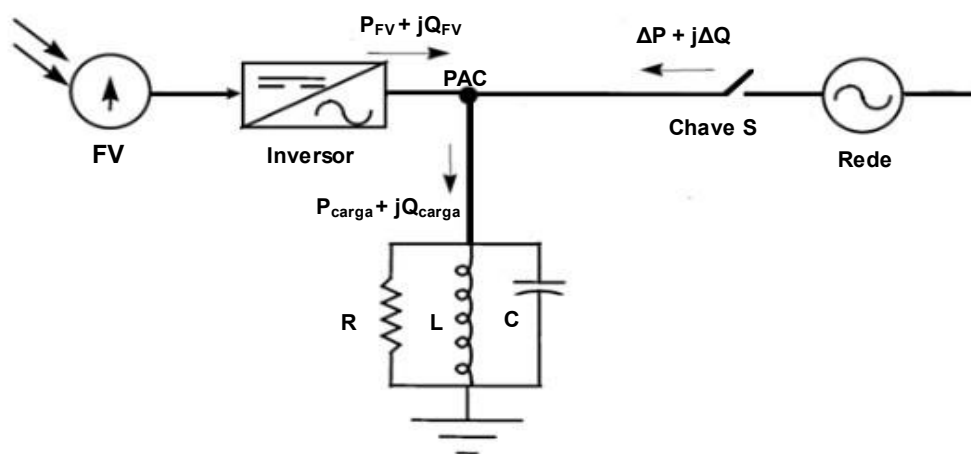
Onde f_i representa a frequência do PAC após o ilhamento.

2.4.3 Zona de Não Detecção (ZND)

As proteções de subtensão, sobretensão, subfrequência e sobrefrequência, presentes nos inversores, na maioria dos casos previnem o ilhamento no sistema fotovoltaico. Porém, em certas condições o ilhamento não pode ser detectado por essas proteções, e o inversor continua operando como se nada tivesse acontecido.

A Figura 6 representa a conexão típica de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, alimentando uma carga RLC paralelo, com os fluxos de potência do sistema identificados.

Figura 6 - Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Adaptado de (BOWER e ROPP, 2002)

Quando a chave S está fechada e a concessionária está conectada ao sistema fotovoltaico, a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos (S_{FV}) flui do inversor para o ponto de acoplamento comum (PAC) e a potência consumida pela carga (S_{carga}) flui do PAC para a carga. As potências S_{FV} e S_{carga} são definidas por (15) e (16) (BOWER e ROPP, 2002).

$$S_{FV} = P_{FV} + jQ_{FV} \quad (15)$$

$$S_{carga} = P_{carga} + jQ_{carga} \quad (16)$$

Sendo P_{FV} a potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico, Q_{FV} a potência reativa fornecida pelo sistema fotovoltaico, P_{carga} a potência ativa consumida pela carga, Q_{carga} a potência reativa consumida pela carga. Logo a potência que flui da concessionária para o PAC é dada por (BOWER e ROPP, 2002).

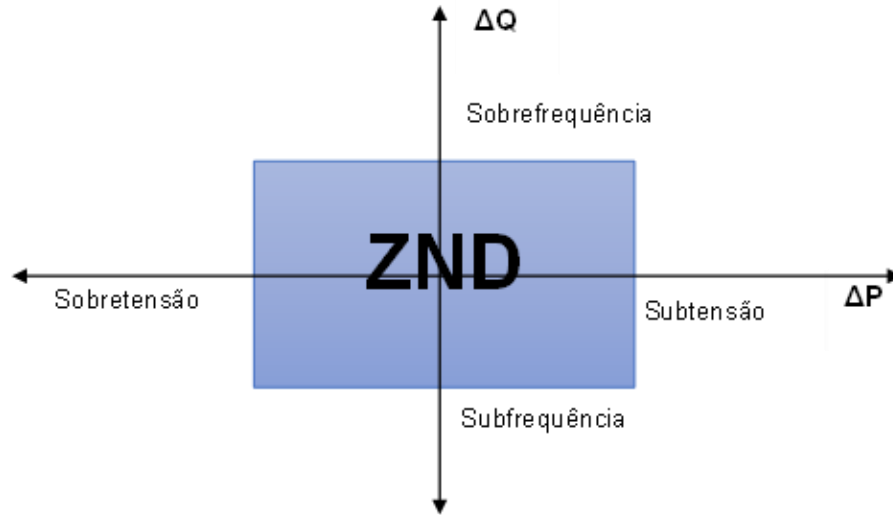
$$\Delta P = P_{carga} - P_{FV} \quad (17)$$

$$\Delta Q = Q_{carga} - Q_{FV} \quad (18)$$

Sendo ΔP a potência ativa fornecida pela rede e ΔQ a potência reativa fornecida pela rede. Caso essas potências forem zero ou possuírem valores próximos de zero, a perturbação dos parâmetros de magnitude, frequência e fase da tensão no PAC será insuficiente para acionar a proteção de anti-ilhamento, formando a zona de não detecção (ZND).

A ZND corresponde a uma região de um gráfico onde a proteção de anti-ilhamento é insensível à formação de ilha. A ZND, mostrada na Figura 7 pela área azul, é um parâmetro usado para determinar a confiabilidade de um método com base no descasamento das potências ativa e reativa. (BOWER e ROPP, 2002)

Figura 7 - Região ZND no plano $\Delta P \times \Delta Q$, para sobre/subtensão e sobre/subfrequência



Fonte: (BOWER e ROPP, 2002)

Na Figura 7, os limites da ZND são definidos pelos valores de proteção de subfrequência, sobrefrequência, subtensão e sobretensão. Portanto, para qualquer condição que resulte em ΔP e ΔQ dentro dessa zona, o ilhamento não é detectado. Esse tipo de mapeamento é o mais conhecido e utilizado entre os métodos passivos.

Para se avaliar o desempenho dos métodos ativos de anti-ilhamento, a utilização do plano $\Delta P \times \Delta Q$ não é o mais adequado. Assim, outras formas de mapeamento são empregadas com parâmetros distintos, tais como, indutância por capacitância normalizada ($L \times C_{norm}$), fator de qualidade por frequência de ressonância ($Q_f \times f_0$), entre outros. Esses mapeamentos da ZND, nesses planos, dependem da condição chamada critério de fase (SILVA, 2016).

O princípio do critério de fase é dado pelo comportamento do PLL, utilizado para manter a corrente do inversor sincronizada com a tensão da rede. Durante o ilhamento, essa corrente tem sua frequência alterada pelo PLL, quando ocorre a desconexão, até que a diferença de fase entre a corrente do inversor e a tensão da rede seja zero, satisfazendo a condição (19) (SILVA, 2016).

$$\varphi_{FV} = \varphi_{carga} \quad (19)$$

Onde φ_{FV} é a fase da corrente de saída do inversor que depende do método anti-ilhamento utilizado e φ_{carga} é a fase da impedância da carga RLC dada por (SILVA, 2016).

$$\varphi_{carga} = \tan^{-1} \left[R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] = \tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \quad (20)$$

Isso acontece, pois o ilhamento suprime a potência consumida ou injetada pela rede (ΔP e ΔQ) e força o SGD a gerar potência igual à potência exigida pela carga ($P_{carga} = P_{FV}$ e $Q_{carga} = Q_{FV}$) (MARTINS DA SILVEIRA, 2020).

A φ_{FV} depende do critério de fase de cada método anti-ilhamento. Os critérios de fase utilizados estão definidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Expressões do critério de fase dos métodos utilizados

MÉTODO ANTI-ILHAMENTO	EXPRESSÃO DO CRITÉRIO DE FASE
OFP - UFP	0
AFD	$\frac{\pi c_f}{2}$
SFS	$\frac{\pi [c_{f_0} + k_{SFS}(f_{PLL} - f)]}{2}$
SMS	$\theta_{max} * \sin \left[\frac{\pi}{2} * \left(\frac{f_{PLL} - f}{f_{max} - f} \right) \right]$

Fonte: Adaptado de (ROPP *et al.*, 2000).

No mapeamento através do plano $L \times C_{norm}$ a ZND é determinada pelos parâmetros da carga para uma determinada resistência, indutância e capacitância normalizada, permitindo saber exatamente para quais faixas de valores desses parâmetros o ilhamento não poderá ser detectado. Esta capacitância normalizada (C_{norm}) é dada por (21) (SILVA, 2016).

$$C_{\text{norm}} = \frac{C}{C_0} = C \omega_0^2 L \quad (21)$$

Onde C é a capacitância da carga considerada e C_0 é a capacitância cuja frequência de ressonância equivale à frequência nominal da rede para um dado valor de indutância L .

No mapeamento da ZND no plano $Q_f \times f_0$, é possível representar a ZND pelo fator de qualidade e da frequência de ressonância da carga, igualando a fase da carga com critério de fase de cada método anti-ilhamento utilizado. Com isso, não é necessário plotar diferentes gráficos para diferentes valores de R para representar a ZND de um método anti-ilhamento, pois o fator de qualidade Q_f reflete de forma proporcional o seu valor. Assim é possível isolar a frequência de ressonância (f_0).

O fator de qualidade é definido por (22) (BOWER e ROPP, 2002).

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (22)$$

Este parâmetro descreve as quantidades de armazenamento de energia e dissipação de energia no circuito RLC. Cargas com altos Q_f geralmente têm grandes capacitâncias e pequenas indutâncias e/ou grandes resistências paralelas. Isso porque indutâncias grandes normalmente têm resistências em série associada que diminui o Q_f do circuito (BOWER e ROPP, 2002).

O fator de qualidade unitário significa que na carga RLC existe uma potência circulante entre o indutor e capacitor. Nesta condição a corrente da carga está em fase com a tensão no PAC, e o circuito RLC se comporta como um elemento puramente resistivo. Os parâmetros da carga RLC são calculados pelas equações (23), (24) e (25) (SILVA, 2016).

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (23)$$

$$L = \frac{V^2}{2\pi f_0 P Q_f} \quad (24)$$

$$C = \frac{Q_f P}{2\pi f_0 V^2} \quad (25)$$

Onde P é a potência ativa fornecida pelo inversor. Quando a rede está desligada, a carga RLC é ilhada com tensão e frequência constante caso a carga RLC esteja ajustado corretamente. A ressonância dos componentes L e C é ajustada para ser igual à frequência nominal da rede, sendo que nenhuma potência reativa é fornecida pelo inversor, além disso a componente resistiva consome toda a potência ativa gerada. (REIS *et al.*, 2015).

As ZND são essenciais para avaliar a capacidade de detecção dos diferentes métodos de anti-ilhamento, sendo eles passivos ou ativos.

2.4.3.1 ZND do método AFD

A partir da Tabela 1 e a equação (20), ao igualar φ_{carga} , com o critério de fase do método AFD, é possível calcular a ZND através do plano $Q_f \times f_0$ (SILVA, 2016).

$$\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi c_f}{2} \quad (26)$$

A equação (26) pode ser reescrita da seguinte forma (SILVA, 2016):

$$f_0^2 - \frac{f * f_0 * \tan\left(\frac{\pi c_f}{2}\right)}{Q_f} - f^2 = 0 \quad (27)$$

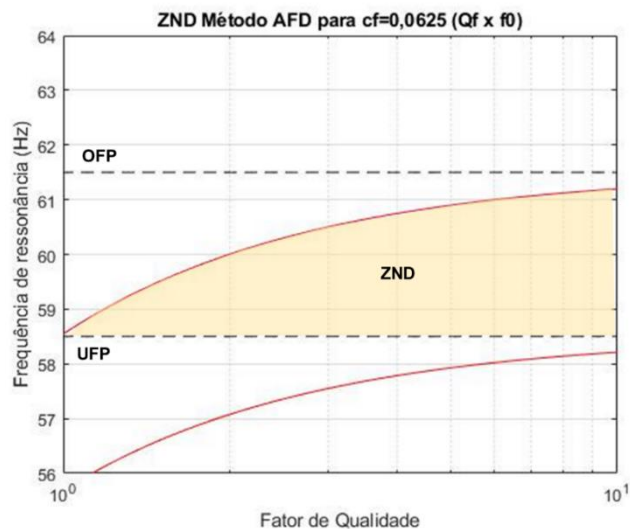
Isolando a frequência de ressonância da equação (27), obtém-se (SILVA, 2016)

$$f_0 = \frac{\frac{f \tan\left(\frac{\pi c f}{2}\right)}{Q_f} + \sqrt{\left(\frac{f \tan\left(\frac{\pi c f}{2}\right)}{Q_f}\right)^2 + 4f^2}}{2} \quad (28)$$

A frequência de ilhamento foi ajustado para as frequências normalizadas ($f_{\min} = 58,5$ Hz e $f_{\max} = 61,5$ Hz). Substituindo f pelas frequências $f_{\min}$ e $f_{\max}$, a área entre os limites superior e inferior é a representação da ZND, e as cargas com os valores de fator de qualidade e frequência dentro dessa área não causam perturbações suficientes para detectar o ilhamento. Na Figura 8 ilustra o gráfico da equação (28) (linhas vermelhas) para $c_f = 0,0625$ e $f = 58,5$ Hz ou $61,5$ Hz, junto com a ZND do método passivo UFP-OFP (linhas tracejadas).

Uma carga RLC com Q_f e f_0 situada dentro da região da ZND (região em amarelo), o método AFD é incapaz de detectar o ilhamento. Observa-se também que para fatores de qualidade baixos, o sistema tem menos ZND e pode detectar ilhamento mais facilmente. Quando o fator de qualidade da carga é alto, o desempenho do método AFD é semelhante ao do método passivo UFP-OFP.

Figura 8 - ZND do método AFD para $c_f = 0,0625$



Fonte: Próprio autor.

2.4.3.2 ZND do método SFS

Assim como o AFD, também é possível calcular a ZND através do plano $Q_f \times f_0$ igualando φ_{carga} , com o critério de fase do método anti-ilhamento (MARTINS DA SILVEIRA, 2020).

$$\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi [c_{f_0} + k_{SFS}(f_{PLL} - f_n)]}{2} \quad (29)$$

A equação (29) pode ser reescrita da seguinte forma

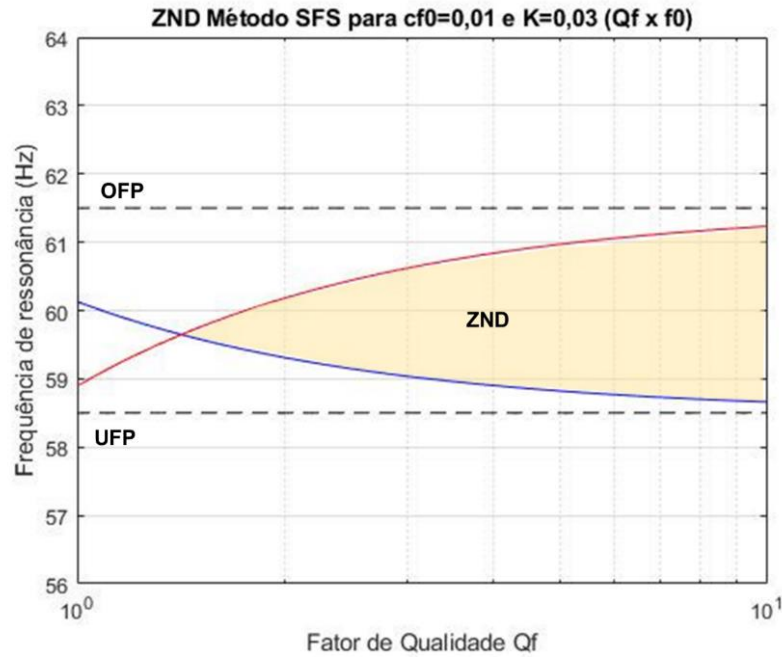
$$f_0^2 - \frac{f * f_0 * \tan\left(\frac{\pi [c_{f_0} + k_{SFS}(f_{PLL} - f_n)]}{2}\right)}{Q_f} - f^2 = 0 \quad (30)$$

Isolando a frequência de ressonância da equação (30), obtém-se

$$f_0 = \frac{\frac{f \tan\left(\frac{\pi [c_{f_0} + k_{SFS}(f_{PLL} - f_n)]}{2}\right)}{Q_f} + \sqrt{\left(\frac{f \tan\left(\frac{\pi [c_{f_0} + k_{SFS}(f_{PLL} - f_n)]}{2}\right)}{Q_f}\right)^2 + 4f^2}}{2} \quad (31)$$

A frequência f foi ajustado para as frequências limites ($f_{\min} = 58,5$ Hz e $f_{\max} = 61,5$ Hz). A frequência do PLL (f_{PLL}) foi definido de acordo o $f_{\min}$ e $f_{\max}$. A Figura 9 ilustra o gráfico da equação (31) para a fator de corte inicial $c_{f_0} = 0,01$, o ganho da realimentação positiva $k_{SFS} = 0,03$ e frequência nominal da rede $f_n = 60$ Hz.

Figura 9 - ZND do método SFS para $c_{f_0} = 0,01$ e $k_{SFS} = 0,03$



Fonte: Próprio Autor.

As linhas vermelhas se referem a frequência $f = f_{max} = 61,5$ Hz e as linhas azuis se referem a frequência $f = f_{min} = 58,5$ Hz. As linhas tracejadas representam a ZND do método passivo.

2.4.3.3 ZND do método SMS

A partir da Tabela 1 e a equação (20), ao igualar φ_{carga} , com o critério de fase do método SMS, é possível calcular a ZND através do plano $Q_f \times f_0$.

$$\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] = \theta_{max} * \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \frac{f_{PLL} - f}{f_{max} - f} \right] \quad (32)$$

A equação (32) pode ser reescrita da seguinte forma

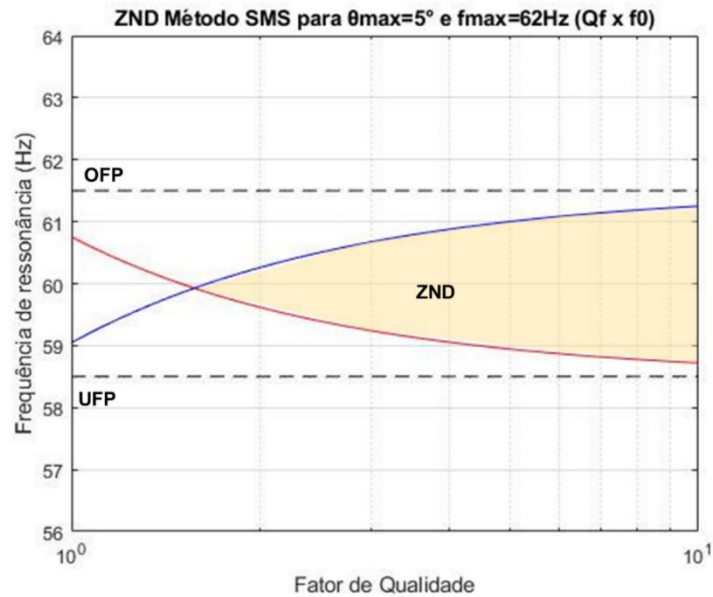
$$f_0^2 - \frac{f \cdot f_0 \cdot \tan\left(\theta_{max} \cdot \sin\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{f_{PLL} - f_n}{f_{max} - f_n}\right]\right)}{Q_f} - f^2 = 0 \quad (33)$$

Isolando a frequência de ressonância da equação (33), obtém-se

$$f_0 = \frac{\frac{f \tan\left(\theta_{max} \cdot \sin\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{f_{PLL} - f_n}{f_{max} - f_n}\right]\right)}{Q_f} + \sqrt{\left(\frac{f \tan\left(\theta_{max} \cdot \sin\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{f_{PLL} - f_n}{f_{max} - f_n}\right]\right)}{Q_f}\right)^2 + 4f^2}}{2} \quad (34)$$

A Figura 10 ilustra o gráfico da equação (34) para o ângulo de fase máximo $\theta_{max} = 5^\circ$, frequência máxima $f_{max} = 62$ Hz e frequência nominal da rede $f_n = 60$ Hz. A frequência f foi ajustada para as frequências limites ($f_{min} = 58,5$ Hz e $f_{máx} = 61,5$ Hz) e a frequência do PLL (f_{PLL}) foi definido de acordo o f_{min} e $f_{máx}$.

Figura 10 - ZND do método SMS



Fonte: Próprio autor.

As linhas vermelhas se referem a frequência $f = f_{max} = 61,5$ Hz e as linhas azuis se referem a frequência $f = f_{min} = 58,5$ Hz. As linhas tracejadas representam a ZND do método passivo OFP-UFP.

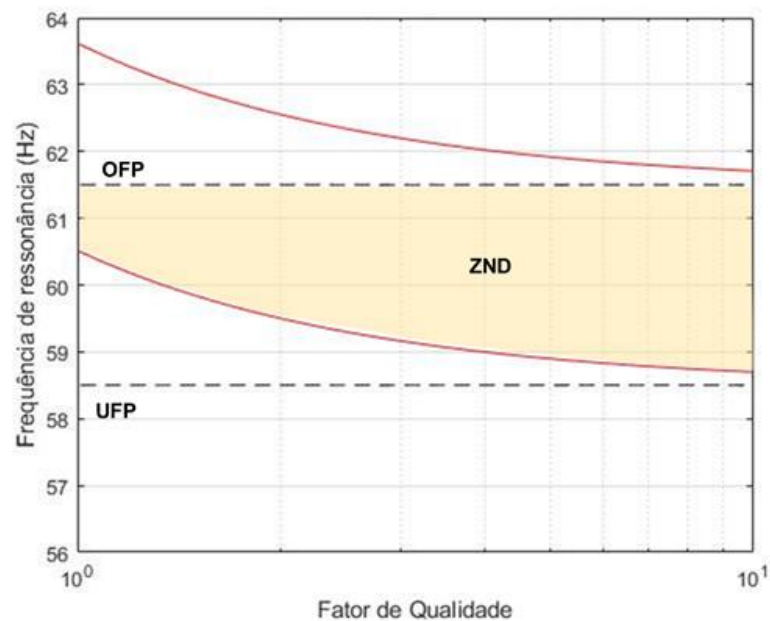
2.4.3.4 ZND do método Injeção de Reativo

Diferente dos três métodos anteriores, nesse método a expressão utilizada para calcular a frequência de ressonância f_0 foi a equação (14) da potência reativa Q fornecida pelo inversor. Essa expressão pode ser rearranjada como:

$$f_0 = \frac{Q * f_i + \sqrt{f_i^2 (Q^2 + 4 * P^2 * Q_f^2)}}{2 * P * Q_f} \quad (35)$$

A frequência de ilhamento foi ajustado para as frequências limites ($f_{\min} = 58,5\text{Hz}$ e $f_{\max} = 61,5\text{Hz}$). Substituindo f_i pelas frequências $f_{\min}$ e $f_{\max}$, a área entre os limites superiores e inferiores é a representação da ZND, e as cargas com os valores de fator de qualidade e frequência dentro dessa área não causam perturbações suficientes para detectar o ilhamento. A Figura 11 ilustra o gráfico da equação (35) para $Q = 67,816 \text{ VAR}$, $P = 1000 \text{ W}$ e $Q_f = 1$.

Figura 11 - ZND do método Injeção de Reativo para $Q=67,816 \text{ VAR}$

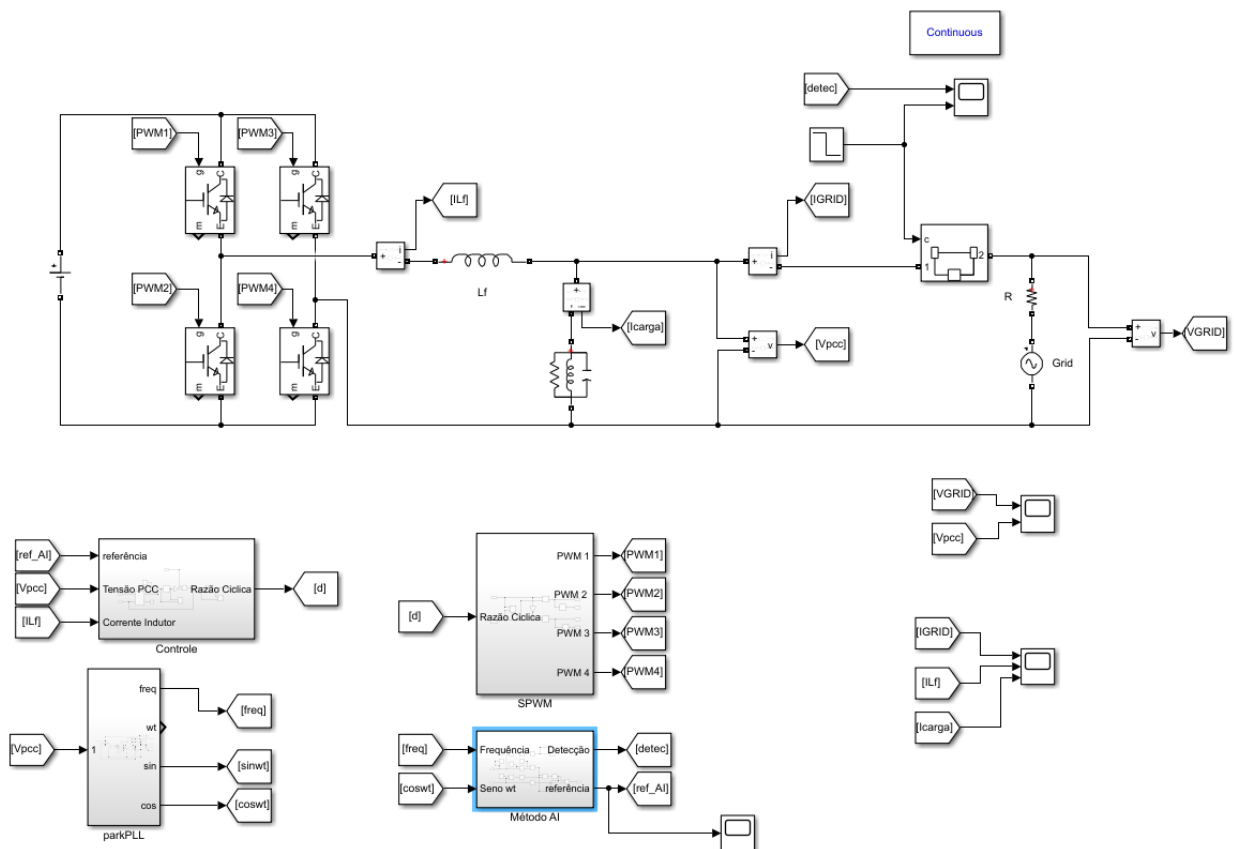


Fonte: Próprio autor.

3 MODELO DE SIMULAÇÃO

Este capítulo descreve o inversor fotovoltaico e as estratégias de anti-ilhamento implementados no ambiente Matlab/Simulink. O inversor tem como função converter a energia contínua gerada pelos painéis em uma energia alternada, que então é disponibilizada para o sistema elétrico. A estratégia de controle é baseada no controle direto da corrente de saída, onde o conversor se comporta como uma fonte de corrente em relação à rede. As estratégias de anti-ilhamento testados são basicamente os métodos ativos que forçam o desvio de frequência. O modelo da simulação está representado na Figura 12:

Figura 12 - Modelo para os testes

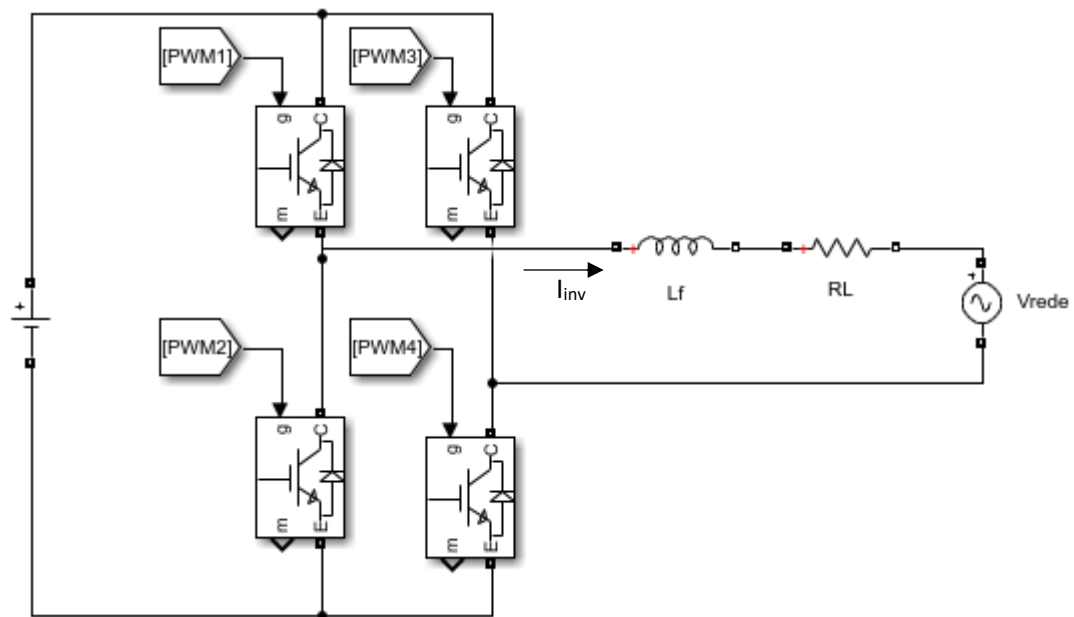


Fonte: Próprio autor.

3.1 INVERSOR MONOFÁSICO

O inversor tem como função converter a energia fotovoltaica CC disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos em padrão CA monofásico. Para isso, é necessário usar modulação e controle apropriado. Neste trabalho foi utilizado um inversor de tensão Full-Bridge, também chamado de onda completa, representado na Figura 13. Os painéis fotovoltaicos são representados pela fonte CC de tensão 400V.

Figura 13 - Inversor monofásico em ponte completa conectada à rede elétrica



Fonte: Próprio autor.

Para esse sistema foi considerada a potência nominal de 1kW e o sistema conectado à rede elétrica de 220V e frequência de 60 Hz. As especificações do inversor monofásico estão descritas na Tabela 2:

Tabela 2 - Especificações do inversor monofásico

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALOR
P_0	Potência do inversor	1 kW
V_{CC}	Tensão no barramento CC	400 V
f_s	Frequência de comutação	10 kHz
V_0	Tensão nominal de saída ou da rede	220 V
f_n	Frequência nominal da rede	60 Hz

Fonte: Próprio autor.

O filtro utilizado na saída do inversor tem a finalidade de remover o conteúdo harmônico produzido pelo inversor, resultante do processo de chaveamento. Os filtros empregados nos inversores ligados à rede podem ser dos tipos: L, LC ou LCL (SILVA, 2016). Neste trabalho o filtro de saída do inversor utilizado é do tipo L e a metodologia utilizada para o cálculo do filtro L é apresentado por (PUPO, 2015).

Primeiramente é calculada a corrente RMS (I_0), como pode ser observado na equação (36) (PUPO, 2015).

$$I_0 = \frac{P_0}{V_0} = \frac{1000}{220} = 4,545 \text{ A} \quad (36)$$

Nesse método, deve-se especificar a distorção harmônica total de corrente. Para esse projeto definiu-se 5% da corrente eficaz de saída do inversor. Com isso a corrente harmônica RMS (I_{hrms}) é dado por (37) (PUPO, 2015).

$$I_{hrms} = 5\% * I_0 = 0,2272 \text{ A} \quad (37)$$

O valor de pico da ondulação da corrente no indutor é determinado por (38) (PUPO, 2015).

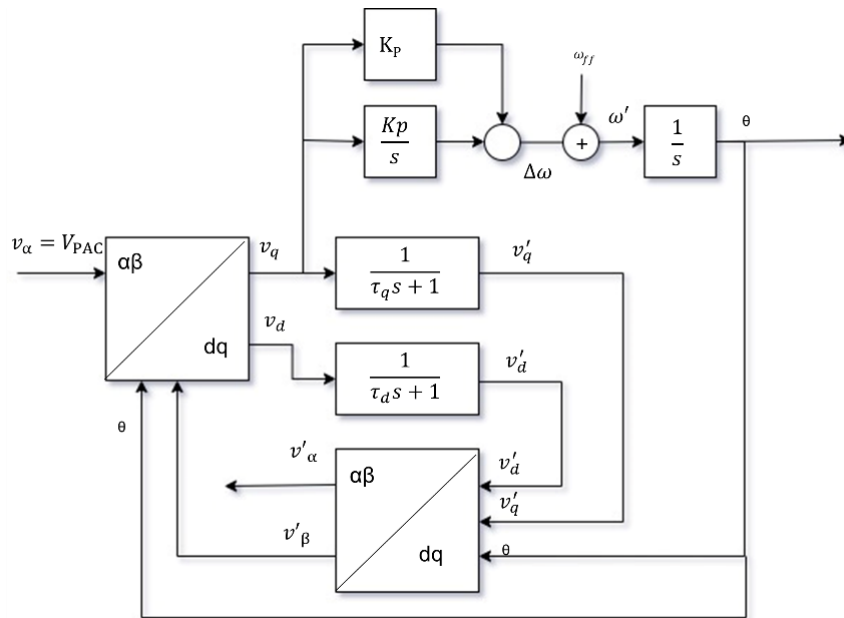
$$i_p = I_{hrms} * \sqrt{2} = 0,3213 \text{ A} \quad (38)$$

Para obter o valor do L_f , é utilizada a seguinte expressão (PUPO, 2015):

$$L_f = \frac{V_{cc}}{4 * f_s * i_p} = \frac{400}{4 * 10000 * 0,3213} = 31,1226 \text{ mH} \quad (39)$$

Para testar os métodos de anti-ilhamento com inversores é necessário conectar em paralelo uma carga RLC ajustável. Para realizar a sincronização é utilizado o método PLL. A estrutura do PLL utilizado é do tipo *Single-phase inverse Park PLL*, observada na Figura 14 (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

Figura 14 – Single-phase inverse Park PLL



Fonte: Adaptado de (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011)

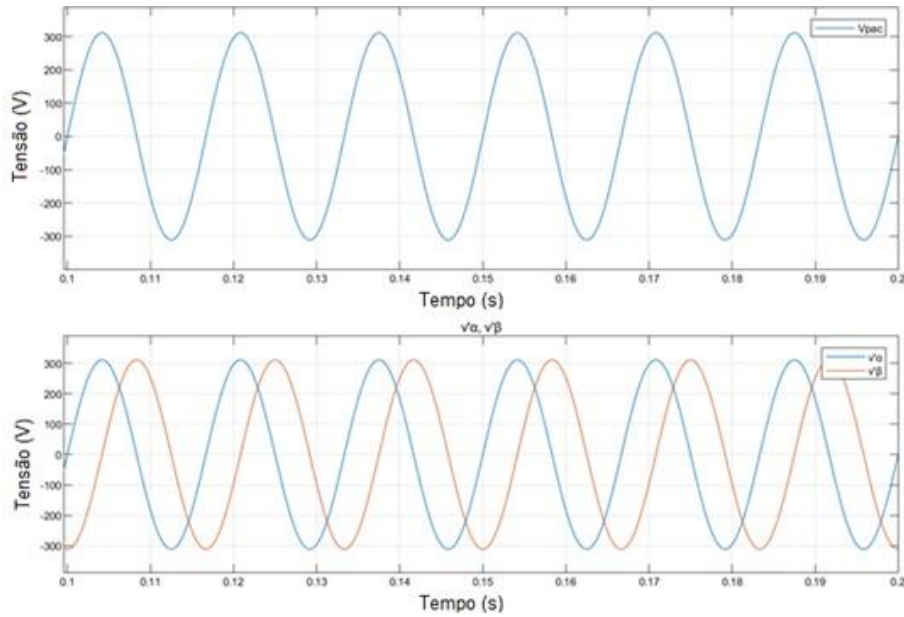
A transformação de Park é usada normalmente como uma ferramenta para projetar um vetor de tensão de entrada, definido por sinais em quadratura no referencial estacionário $\alpha\beta$, nos eixos ortogonais do referencial síncrono dq. Para uma determinada posição angular, a matriz de transformação de Park, definida por (40), é uma transformação linear que pode ser invertida como definida por (41) (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$v_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (41)$$

Uma imagem em quadratura de um sinal de entrada monofásica pode ser obtida pela introdução de um filtro em um loop, que consiste nas transformações de Park direta e inversa, conforme mostrado na Figura 14. Se v_α e v_β não estiverem em quadratura, as formas de onda v_d e v_q resultantes da transformação direta de Park terá oscilações. Essas oscilações serão atenuadas por um filtro passa-baixas, dando origem aos sinais v'_d e v'_q . Portanto, os sinais v'_α e v'_β resultantes da aplicação da transformada de Park inversa a v'_d e v'_q estarão em quadratura, embora v_α e v'_α não estarão em fase se o PLL não estiver perfeitamente sincronizado. A medida que o PLL trava o ângulo de fase do sinal de entrada, v_α fica em fase com v'_α e em quadratura com v'_β , como mostra a Figura 15. (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011).

Figura 15 - Formas de onda do da tensão no PAC e dos sinais $v' \alpha$ e $v' \beta$



Fonte: Próprio autor.

As constantes de tempo τ_q e τ_d dos dois filtros de primeira ordem determinam o comportamento dinâmico do PD (phase detector). Na estrutura do PLL, o PD é responsável por gerar um sinal de saída proporcional à diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal gerado pelo PLL. Os componentes filtrados v'_d e v'_q são dados no domínio da frequência por (42) e (43).

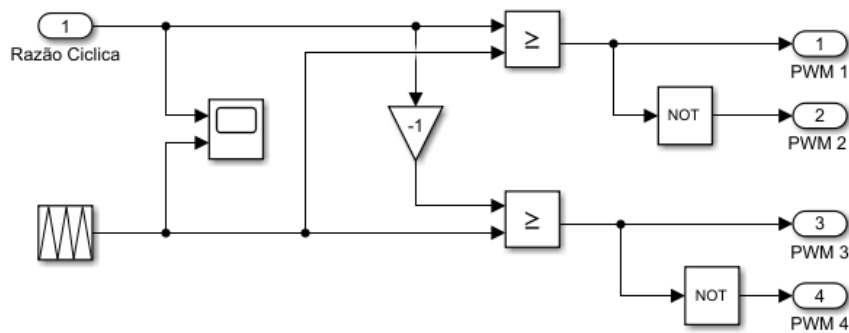
$$v'_d = \frac{v_d(s)}{\tau_d s + 1} \quad (42)$$

$$v'_q = \frac{v_q(s)}{\tau_q s + 1} \quad (43)$$

Nesse trabalho, as frequências de corte dos filtros d e q foram configurados para 120Hz, e definindo k_p e k_i do controlador PI como sendo $k_p = 0,418$ e $k_i = 19,236$. O diagrama de blocos do PLL implementado no Simulink pode ser observada na Figura 16.

O inversor é modulado em PWM (*Power Width Modulation*) com frequência de chaveamento de 10 kHz. O circuito do modulador PWM é ilustrado na Figura 18. O sinal de entrada razão cíclica é comparado com uma portadora triangular, gerando os pulsos de acionamento das chaves do inversor monofásico.

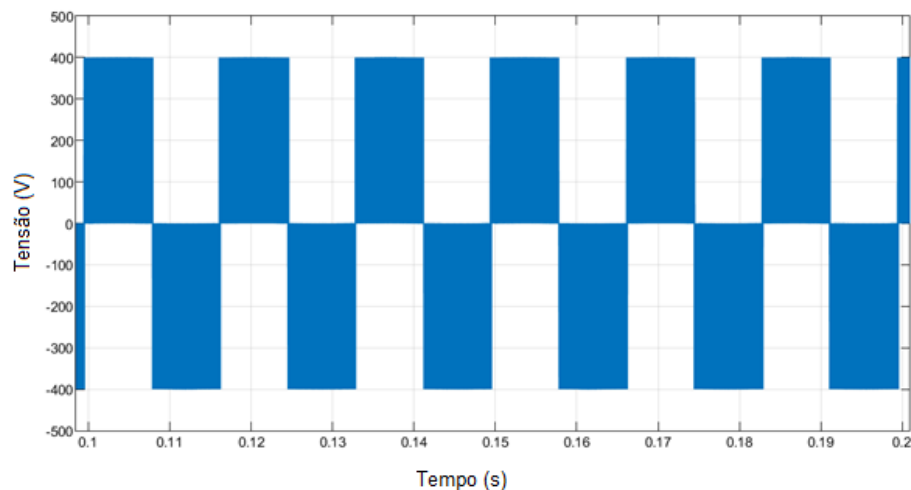
Figura 18 - Circuito do modulador PWM



Fonte: Próprio autor.

A tensão de saída do inversor é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC. A configuração do PWM apresentado na Figura 18 produz na saída do inversor uma tensão de três níveis (positivo, zero e negativo) como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Tensão de saída do inversor com três níveis



Fonte: Próprio autor.

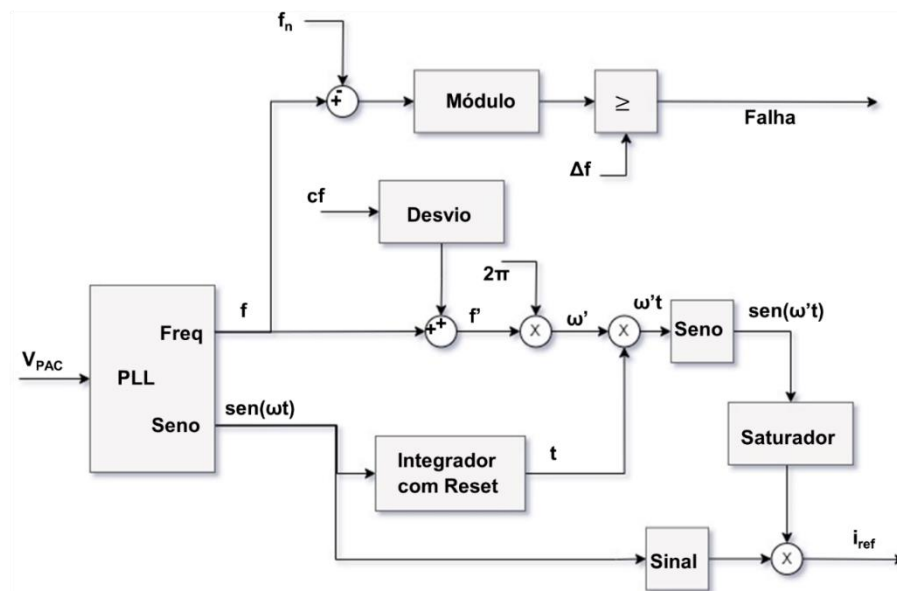
3.2 MÉTODOS ANTI-ILHAMENTO AVALIADOS

Nesse trabalho foram avaliados apenas métodos anti-ilhamento ativos que alteram a frequência no ilhamento. São eles, o método de Desvio Ativo de Frequência (AFD), o método Desvio Ativo de Frequência com Realimentação Ativa (SFS), o método Desvio de Frequência no Modo Escorregamento (SMS) e o método de Injeção de Reativo.

3.2.1 Método Desvio Ativo de Frequência

A estratégia usada para o teste do algoritmo AFD (BRITO *et al.*, 2018) representado na Figura 20.

Figura 20 - Estratégia para teste do algoritmo AFD



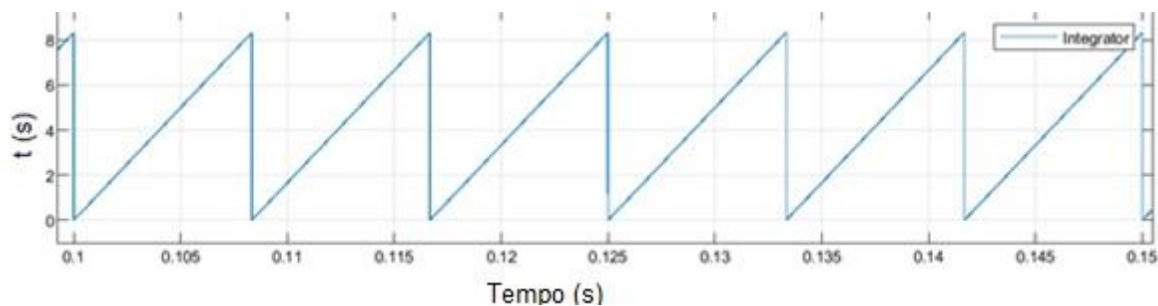
Fonte: Próprio autor.

Esse método faz com que a corrente de saída do inversor seja uma onda senoidal com uma frequência ligeiramente superior à tensão da rede, para isso acontecer, o algoritmo utiliza a frequência fornecida pelo PLL, que está sincronizado com a rede em 60Hz, e soma desvio δf para ficar ligeiramente superior a tensão da rede, em seguida essa frequência f' é convertida para a frequência angular ω' .

Quando a corrente do inversor chega a zero, ela permanece em zero por um tempo t_z até o início do segundo semi-ciclo. Esse tempo é conhecido como tempo zero ou tempo morto. Para realizar essa sincronização nos cruzamentos por zero é utilizado o sinal fornecido pelo PLL que irá resetar o bloco integrador que possui resete externo, resetando a cada cruzamento com zero.

A saída do bloco integrador apresenta uma rampa equivalente ao tempo, devido à entrada constante. Porém, essa integração é reiniciada a cada semi-ciclo, fazendo com que seu sinal de saída apresente forma de onda dente de serra, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Forma de onda da saída do bloco integrador

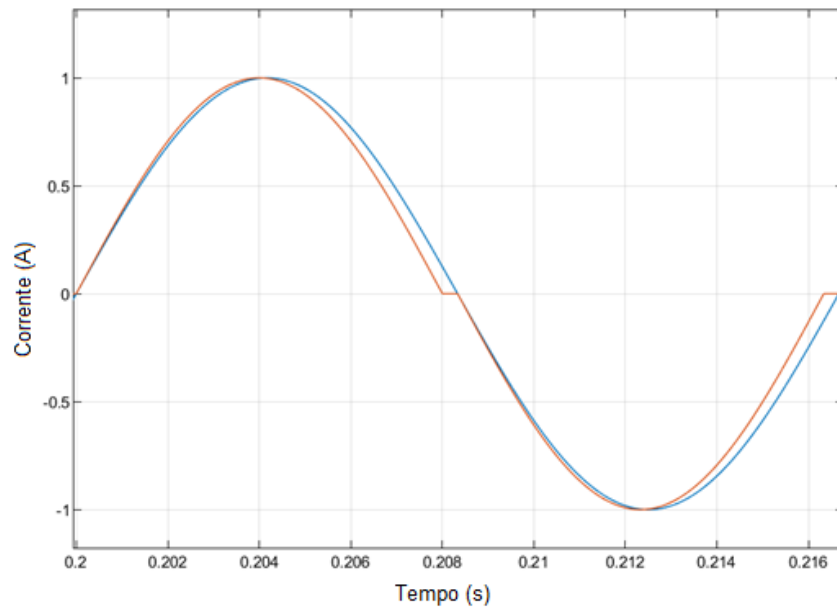


Fonte: Próprio autor.

Multiplicando o ω' com o tempo t fornecido pelo bloco integrador, é obtido o $\omega't$. Porém, como a frequência angular ω' é diferente da ω da rede, que é utilizado como referência para o bloco integrador, o resultado do $\text{seno}(\omega't)$ apresenta uma deformação na forma de onda. Adicionalmente, devido ao sinal do bloco do integrador, ocorre uma retificação de onda completa. A diferença entre essas duas frequências resulta no tempo zero t_z quando a forma de onda do $\text{seno}(\omega't)$ passa pelo saturador, que é configurado para impedir que o sinal fique negativo. Observa-se que o saturador é necessário apenas se o c_f for positivo.

Por fim, para sincronizar os semi-ciclos do $\text{seno}(\omega't)$ com a forma de onda senoidal da rede, a forma de onda que sai do bloco saturador é multiplicada pelo sinal de $\text{sen}(\omega t)$. O bloco sinal fornece na saída o valor 1 quando o sinal de entrada é positivo, -1 quando a entrada é negativa e zero quando a entrada for zero. Dessa forma, o sinal na saída do método AFD fica como observado na Figura 22.

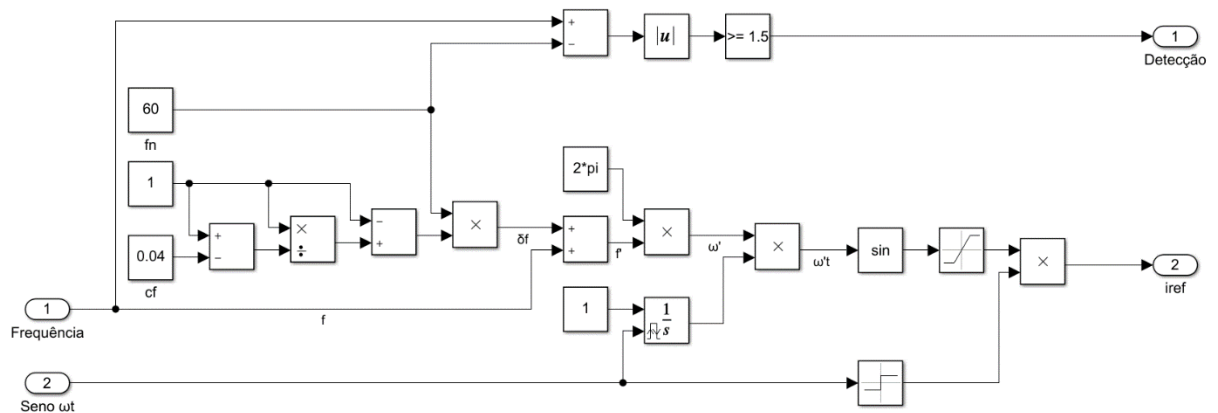
Figura 22 - Forma de onda da corrente de referência (laranja) e o sinal senoidal de referência (azul)



Fonte: Próprio autor

O diagrama de blocos do método AFD implementado no Simulink está representado na Figura 23.

Figura 23 - Método AFD no Simulink

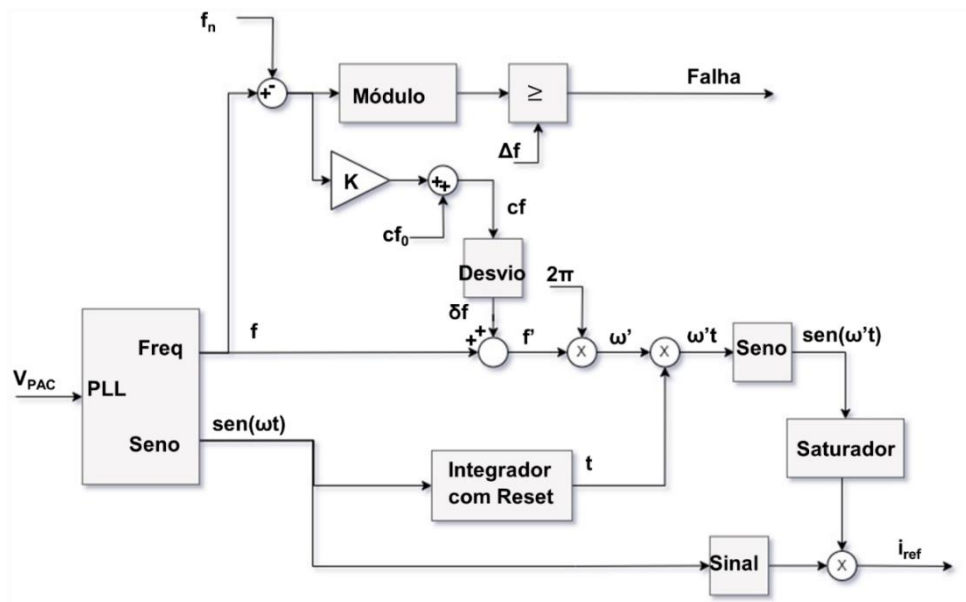


Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Método Desvio ativo de frequência com realimentação positiva

Com este método a frequência da tensão no PAC só é mantida em 60 Hz caso a rede esteja presente. A estratégia de implementação do método SFS pode ser verificada na Figura 24.

Figura 24 - Estratégia de implementação do método SFS



Fonte: Próprio autor.

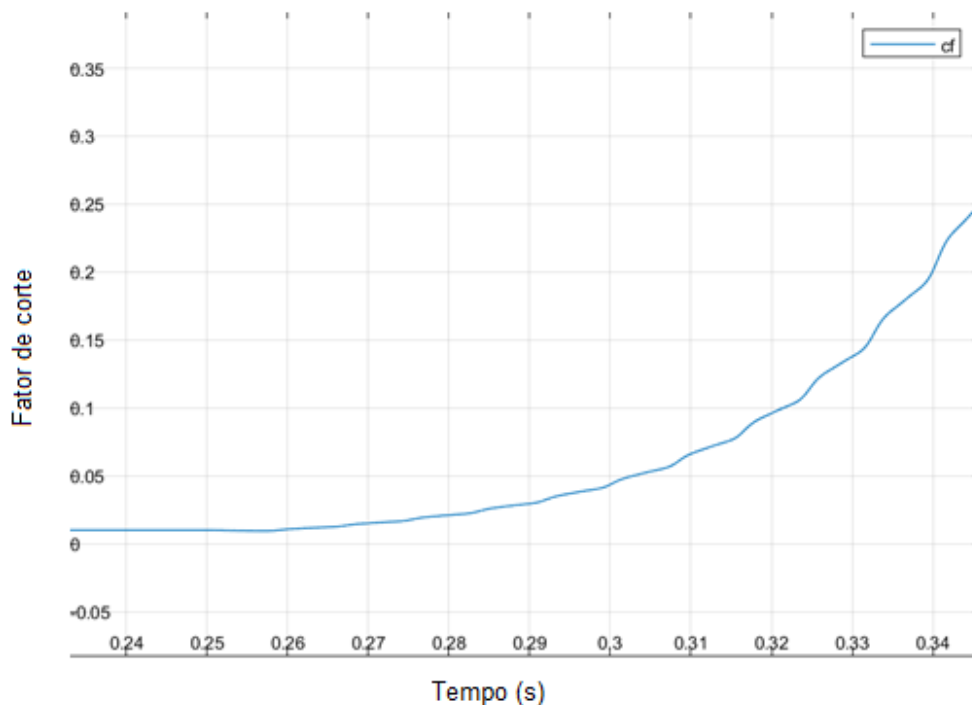
O método SFS melhora o desempenho do método AFD adicionando realimentação positivo ao método AFD, a fim de desviar a frequência do seu valor nominal mais rápido. Por essa razão, o algoritmo do SFS utilizado é semelhante ao algoritmo AFD, alterando somente a parte do fator de corte que varia de acordo com a variação da frequência medida.

Para obter a fator de corte, a frequência fornecida pelo PLL é comparada com a frequência nominal da rede. A diferença entre essas duas frequências é multiplicada pelo ganho K e somado com a fator de corte inicial c_{f0} , resultando no c_f . Com o c_f é possível calcular o desvio de frequência δf que é somado com a frequência do PLL. A partir daqui o funcionamento do método SFS é igual ao método AFD.

A soma do δf com a frequência do PLL resulta na frequência f' que é convertida em frequência angular ω' multiplicando f' com 2π . Para realizar a sincronização nos cruzamentos por zero é utilizado o sinal senoidal fornecido pelo PLL que reseta o bloco integrador a cada cruzamento com zero. A ω' é multiplicado com o tempo t fornecido pelo bloco integrador, obtendo $\omega't$. O $\text{seno}(\omega't)$ passa pelo saturador, que está configurado para impedir que o sinal fique negativo. Por fim, a forma de onda que sai do saturador é multiplicada com o sinal de $\text{seno}(\omega t)$.

Em condições normais, a frequência medida no PAC é igual à frequência da rede. Logo, o fator de corte é igual ao fator de corte inicial. Porém quando há ilhamento, aparece uma diferença entre essas duas frequências, que aumenta continuamente, até que o ilhamento seja detectado. O comportamento do fator de corte pode ser observado na Figura 25 sendo que o ilhamento ocorre no tempo 0,25 s.

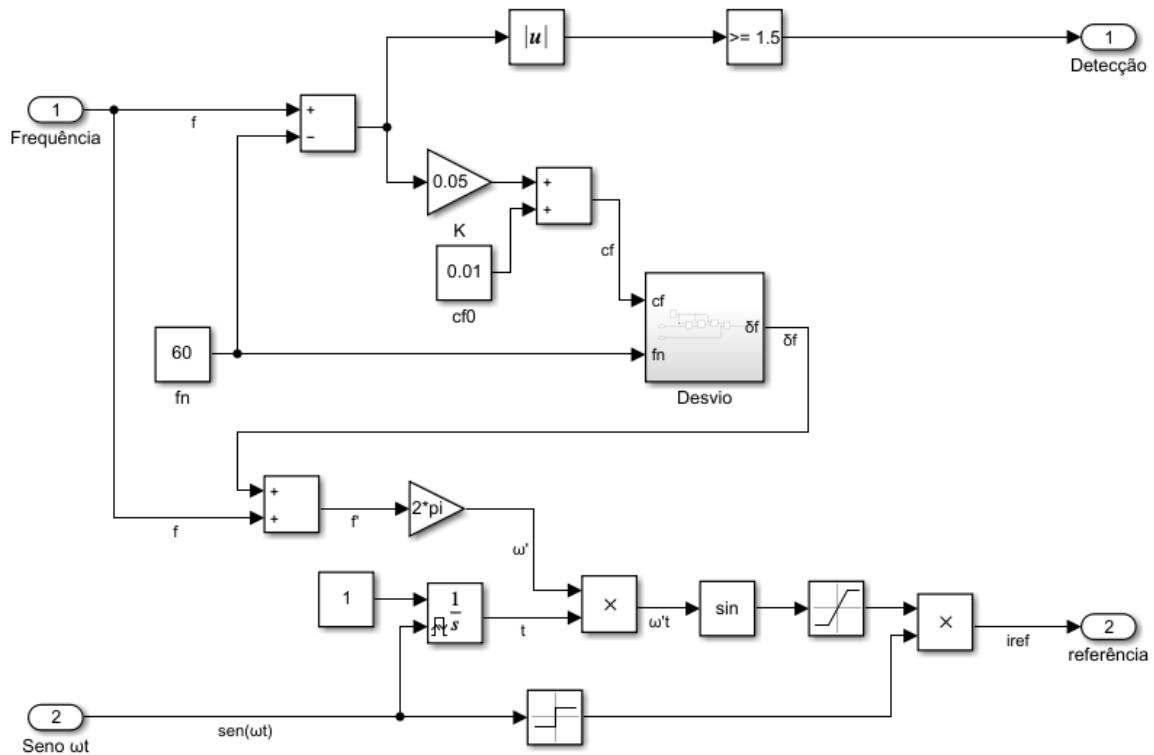
Figura 25 - Fator de corte c_f do método SFS



Fonte: Próprio autor.

O diagrama de blocos do método SFS implementado no Simulink está representado na Figura 26.

Figura 26 - Método SFS no Simulink



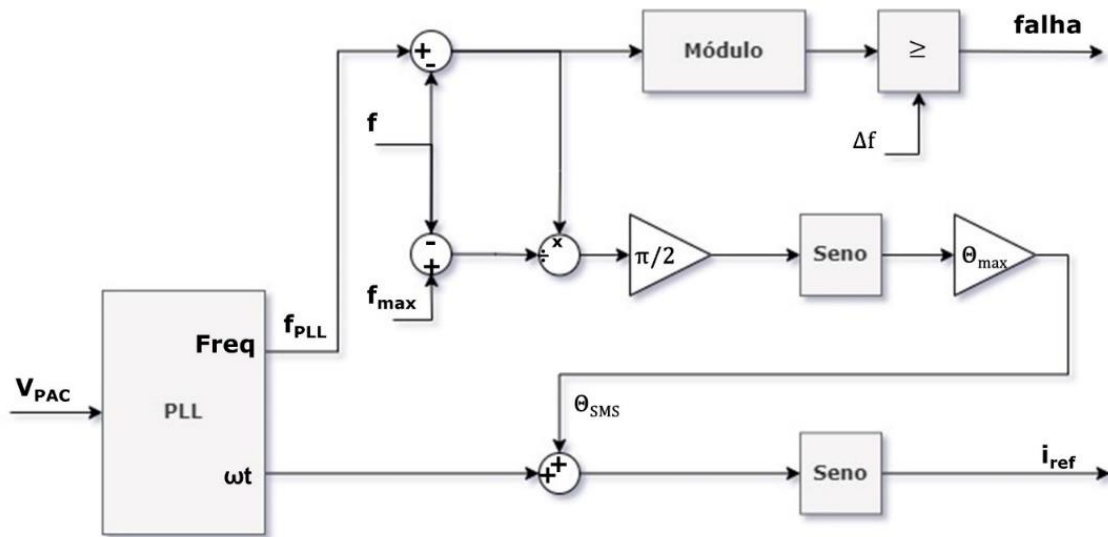
Fonte: Próprio autor.

3.2.3 Método Desvio de Frequência no modo Escorregamento

Esse método altera o ângulo de fase da corrente do inversor somando um θ_{SMS} , que varia de acordo com a comparação entre a frequência da tensão no PAC e a frequência nominal da rede elétrica. Essa comparação é realizada pela realimentação positiva, semelhante ao método SFS. A corrente de referência i_{ref} e a fase para esse método são apresentadas nas equações (7) e (8). A estratégia utilizada para o teste do algoritmo SMS é representada pela Figura 27 (BRITO *et al.*, 2018).

O algoritmo replica o cálculo do θ_{SMS} da equação (10). O objetivo do método é impor uma variação na fase da frequência da corrente do inversor, porém, na presença da rede o método não consegue fazer a operação, no entanto, no instante em que a rede está ausente, a frequência começa a ser modificada.

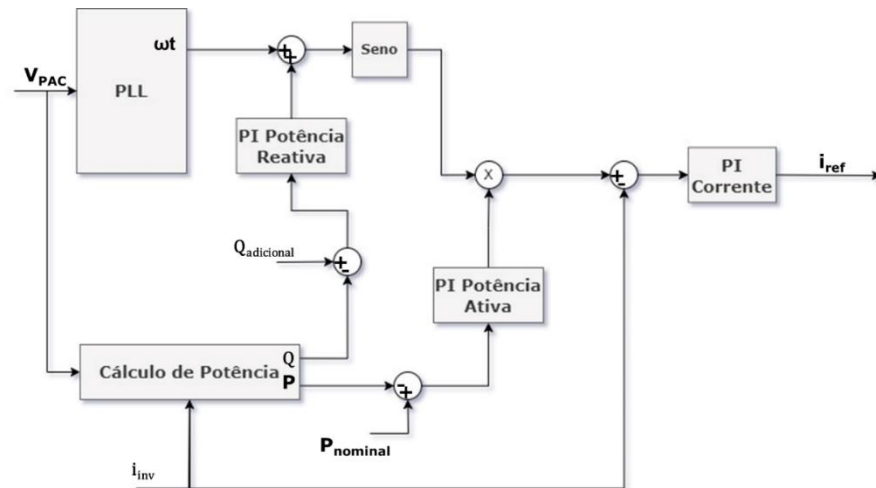
Figura 27 - Estratégia para teste do algoritmo SMS



Fonte: Próprio autor.

O PLL fornece os parâmetros frequência e fase da tensão no PAC. Essa frequência fornecida pelo PLL (f_{PLL}) é subtraída pela frequência de referência (f), que é configurada para ser próxima da nominal da rede de forma que a diferença entre a f_{PLL} e f seja pequena. Essa diferença é dividida pela diferença entre a frequência máxima f_{max} e f . O quociente é multiplicado por $\pi/2$, em seguida, calculado o seno do produto dessa multiplicação. Por fim, o seno é multiplicado pelo θ_{max} resultando no θ_{SMS} . Para obter a i_{ref} do método SMS, é calculado o seno da soma do θ_{SMS} com ωt fornecido pelo PLL. Baseado na estratégia da Figura 27, foi desenvolvido o modelo do algoritmo SMS da Figura 28 no Simulink.

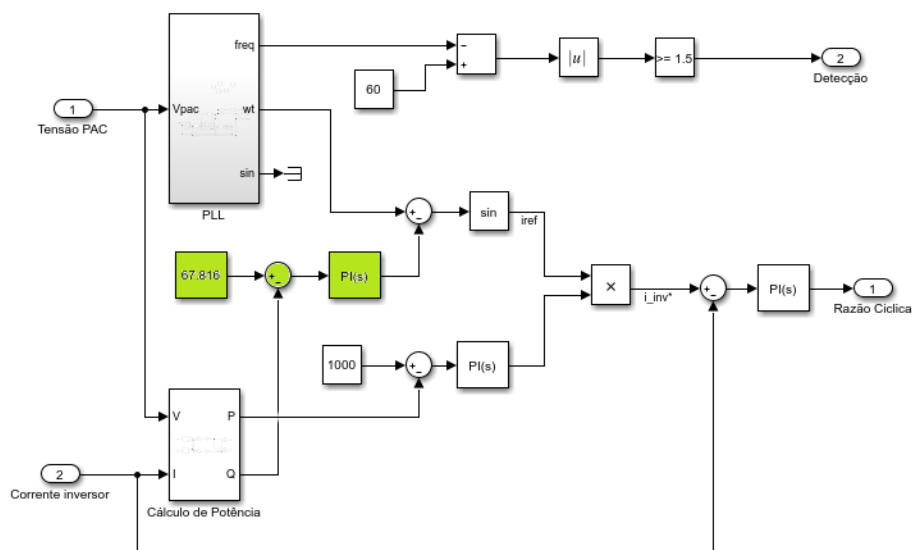
Figura 29 - Estratégia para teste do algoritmo do método Injeção de Reativo



Fonte: Próprio autor.

É adicionada uma malha para o controle da energia reativa, que altera a fase da corrente em relação à fase da tensão da rede. O diagrama de blocos do método Injeção de Reativo, em verde, adicionado à malha de controle de potência do inversor, pode ser visto na ilustração da Figura 30.

Figura 30 – Diagrama de blocos do método Injeção de Reativo no Simulink



Fonte: Próprio autor.

3.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi mostrado o sistema fotovoltaico utilizado para realizar os testes dos métodos anti-ilhamento ativos. As estratégias dos métodos anti-ilhamento AFD, SFS, SMS e Injeção de Reativo tiveram como base as estratégias desenvolvidas por (BRITO *et al.*, 2018). Tanto os sistemas fotovoltaicos quanto os métodos anti-ilhamento ativos foram implementados no ambiente MatLab/Simulink.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

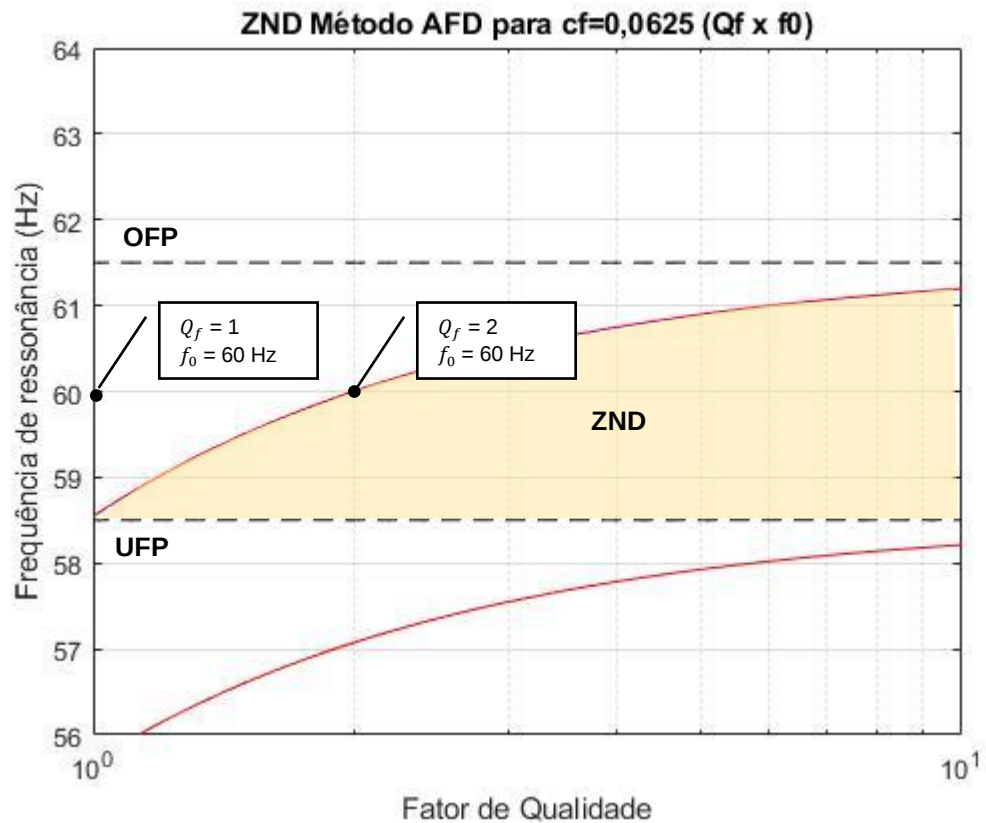
Nesse capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas utilizando as estratégias abordadas no capítulo anterior junto com mapeamento da ZND de cada método apresentadas no item 2.4.3. Neste trabalho, os parâmetros escolhidos para avaliar as ZND foram o fator de qualidade da carga por frequência de ressonância ($Q_f \times f_0$). Para observar o ZND de cada método, foram realizados testes com cargas RLC de diferentes parâmetros. Nos resultados, a detecção ocorre quando o valor da frequência ultrapassar os limites de frequências estabelecidas pela norma, sendo 61,5 Hz para o limite superior e 58,5 Hz para o limite inferior.

4.1 RESULTADOS DO MÉTODO AFD

Para a simulação, foi definida uma variação de frequência, δf , de 4Hz para a frequência da corrente injetada na rede. Com a variação definida, a frequência da corrente do AFD é $f' = 64\text{Hz}$, e com esse valor é possível definir a fator de corte com a equação (4), obtendo $c_f = 0,0625$. Esses valores são os mesmos parâmetros usados para calcular a ZND do método AFD, apresentado no item 2.4.3.1, com o objetivo de observar o comportamento do método para alguns pontos presente na ZND.

Realizou-se um ensaio com a carga com os parâmetros $Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{ Hz}$ e para observar o comportamento do método AFD com cargas próximas a fronteira na ZND, determinou-se cargas com o fator $Q_f = 2$ para a análise. A partir da ZND calculada, a carga com o parâmetro $Q_f = 2$ e $f_0 = 60\text{ Hz}$ localiza-se, aproximadamente, sobre a fronteira da ZND, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 - ZND do Método AFD com os pontos analisados



Fonte: Próprio autor.

Para o ponto $Q_f = 2$ e $f_0 = 60$ Hz, foram realizadas mais duas simulações para com a frequência a 0,1 Hz superior e outra com a frequência 0,1 Hz inferior. Na Tabela 3 estão as cargas utilizadas nos ensaios realizados e a localização da carga em relação a ZND.

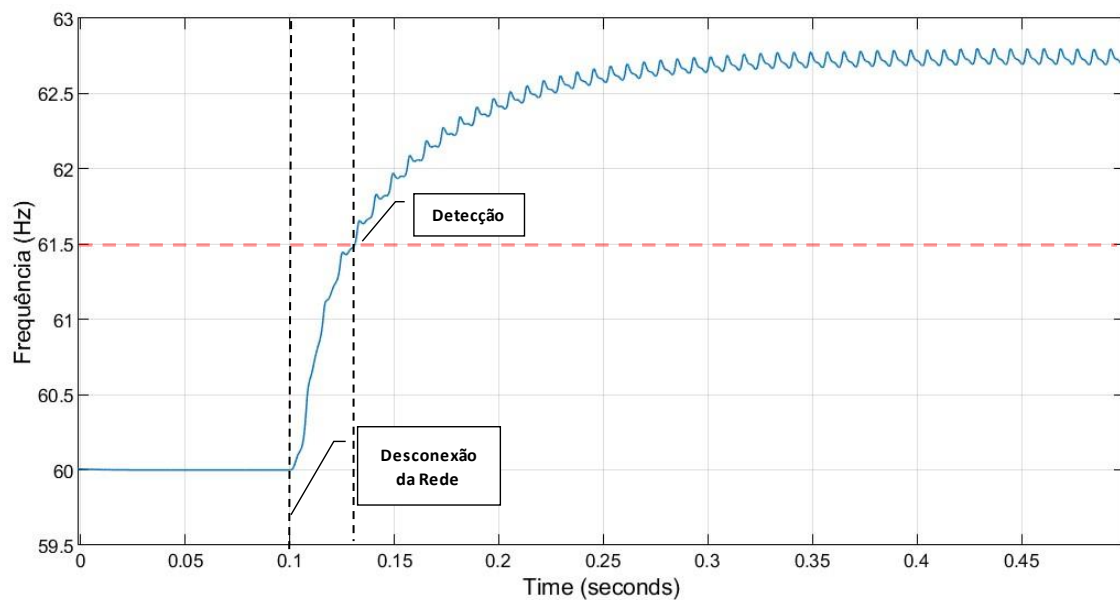
Tabela 3 - Cargas dos ensaios para o método AFD

ENSAIO	CARGA	ZND
1º	$Q_f = 1$ E $f_0 = 60$ Hz	FORA
2º	$Q_f = 2$ E $f_0 = 60$ Hz	FRONTEIRA
3º	$Q_f = 2$ E $f_0 = 60,1$ Hz	FORA
4º	$Q_f = 2$ E $f_0 = 59,9$ Hz	DENTRO

Fonte: Próprio autor.

O primeiro ensaio (Figura 32), a carga se localiza fora da ZND, logo o esperado é que o ilhamento seja detectado, o que ocorreu na simulação. Após o ilhamento, a frequência estabilizou-se aproximadamente em 62,8 Hz com o tempo de detecção foi de 0,03 s.

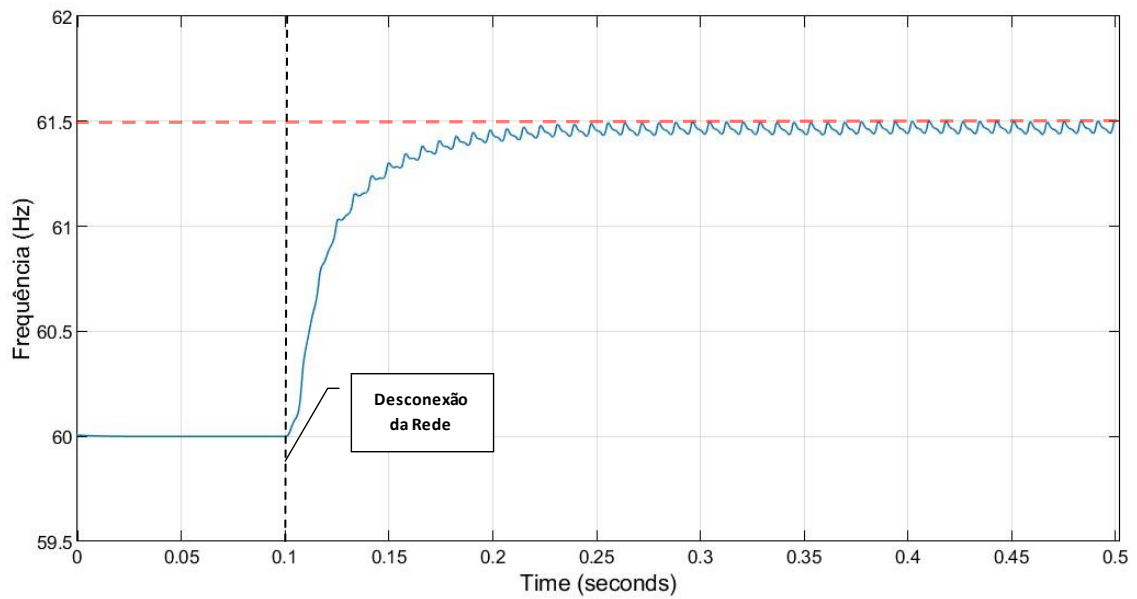
Figura 32 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 1$ e $f_0 = 60$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O segundo ensaio (Figura 33), a carga se localiza muito próximo da fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize próximo a frequência limite para a detecção, que nesse caso é 61,5 Hz, o que ocorreu na simulação.

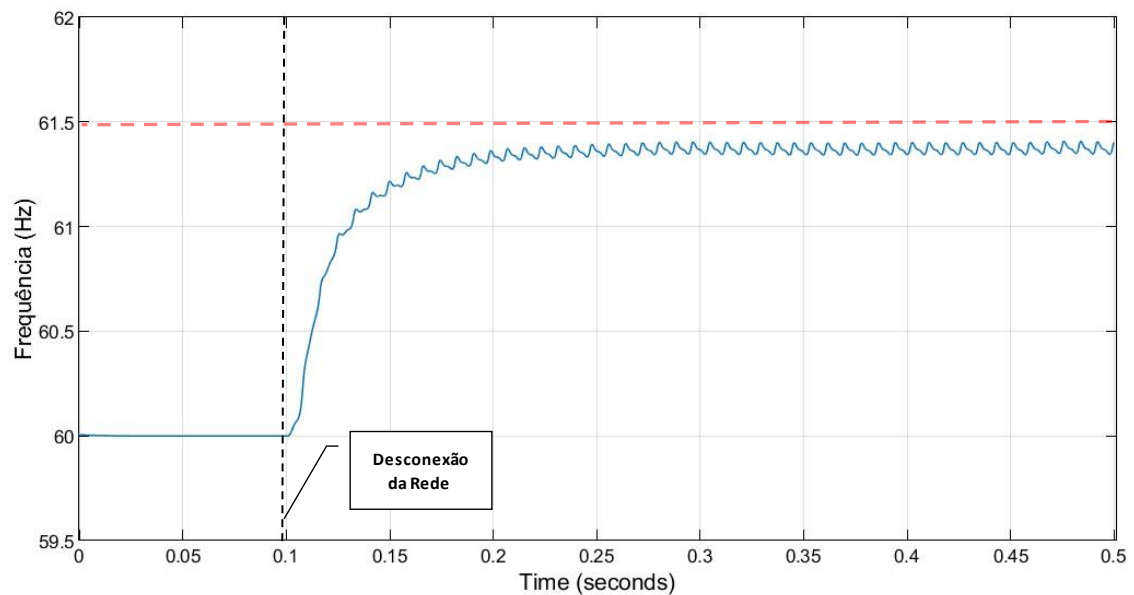
Figura 33 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O terceiro ensaio (Figura 34), a carga se localiza dentro e próximo ao limite da ZND, e como esperado o ilhamento não foi detectado. A frequência estabilizou em 61,4 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

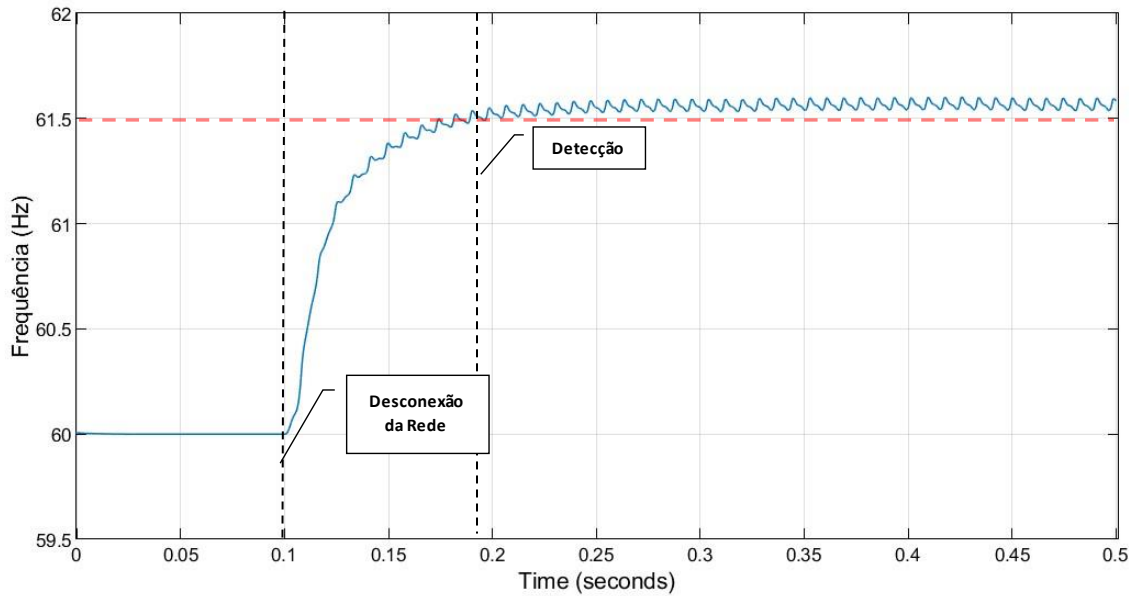
Figura 34 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,9$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O quarto ensaio (Figura 35), a carga se localiza fora e próximo do limite da ZND, e como esperado o ilhamento foi detectado na simulação. Após o ilhamento, a frequência estabiliza em 61,6 Hz com o tempo de detecção de 0,09 s aproximadamente.

Figura 35 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,1$ Hz



Fonte: Próprio autor.

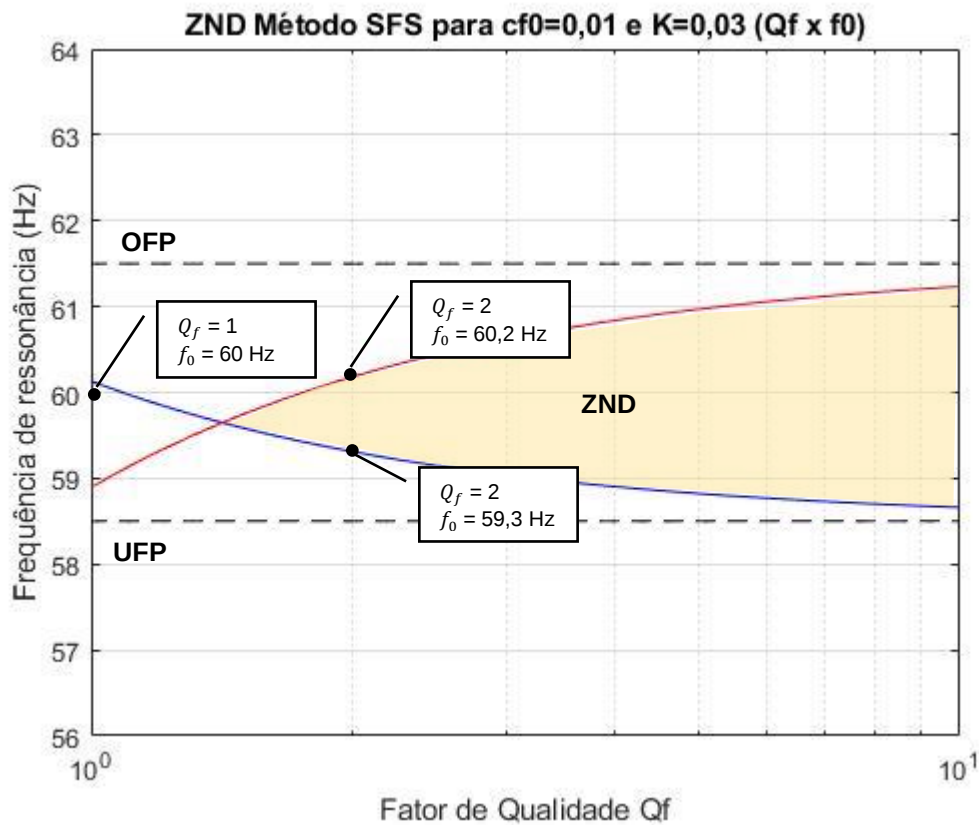
Comparando o resultado do primeiro e segundo ensaios, nota-se que para Q_f maiores, o desvio da frequência é menor. Além disso, cargas com parâmetros localizados próximo à fronteira da ZND, a variação da frequência estabiliza próximo a frequência limite para a detecção, podendo ser observada no segundo, terceiro e quarto ensaios.

4.2 RESULTADOS DO MÉTODO SFS

Para a simulação no Simulink, foi definido a fator de corte inicial $c_{f_0} = 0,01$ e o ganho $k_{SFS} = 0,03$, os mesmos parâmetros utilizados para calcular a ZND do método SFS, observada na Figura 9, que serviu como base na escolha das cargas utilizadas nas simulações.

Realizou-se um ensaio com a carga com os parâmetros $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$ e para observar o comportamento do método SFS com cargas próximas a fronteira na ZND, determinou-se cargas com o fator $Q_f = 2$ para a análise. A partir da ZND calculada, as cargas com o parâmetro $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,2 \text{ Hz}$ e $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,3 \text{ Hz}$ localizam-se, aproximadamente, sobre fronteira da ZND, como pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 - ZND do Método SFS com os pontos analisados



Fonte: Próprio autor.

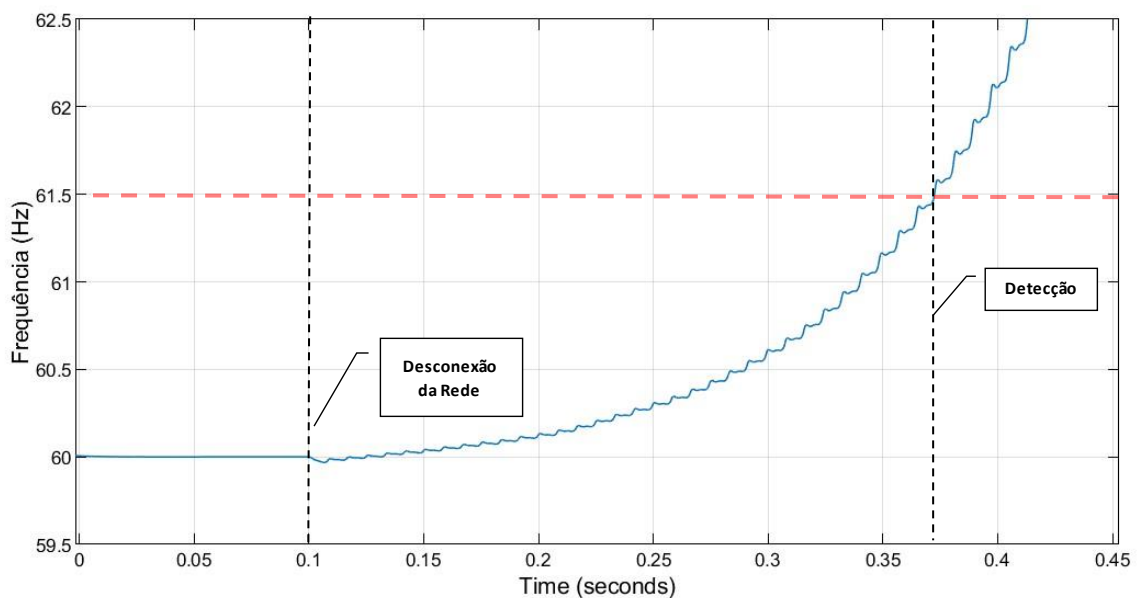
Para esses dois pontos próximos à fronteira, $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,2 \text{ Hz}$ e $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,3 \text{ Hz}$, foram realizadas mais duas simulações para cada com a frequência a 0,1 Hz superior e outra com a frequência 0,1 Hz inferior. Na Tabela 4 estão as cargas utilizadas nos ensaios realizados e a localização da carga em relação a ZND.

Tabela 4 - Cargas dos ensaios do método SFS

Ensaio	Carga	ZND
1º	$Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{Hz}$	Fora
2º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,2\text{Hz}$	Fronteira
3º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,3\text{Hz}$	Fora
4º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,1\text{Hz}$	Dentro
5º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,3\text{Hz}$	Fronteira
6º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4\text{Hz}$	Dentro
7º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,2\text{ Hz}$	Fora

Fonte: Próprio autor.

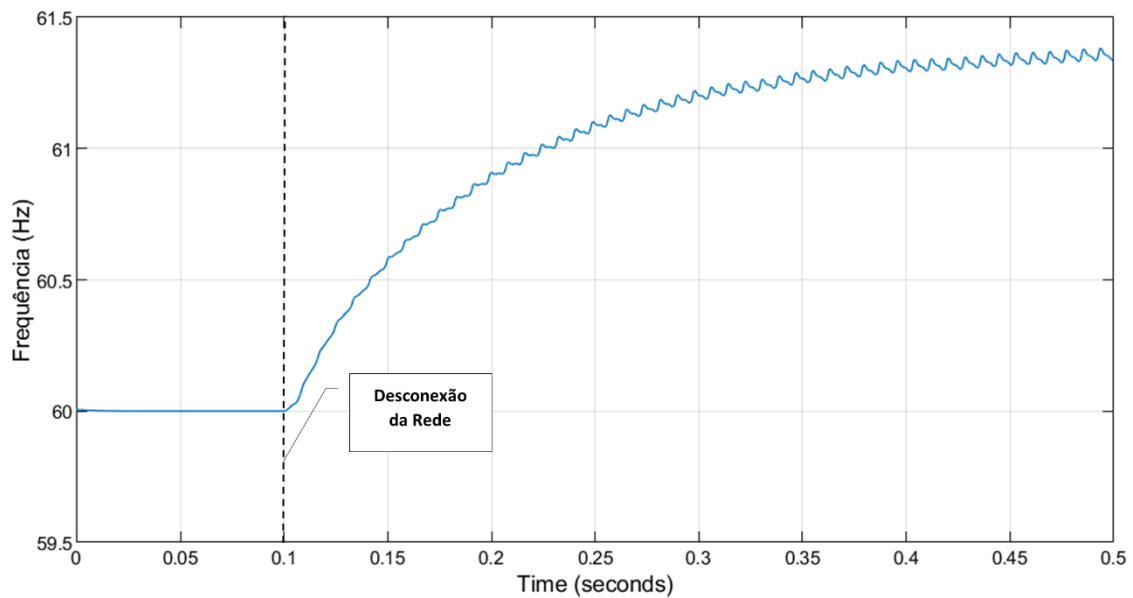
O primeiro ensaio (Figura 37), a carga se localiza fora da ZND, logo o esperado é que o ilhamento seja detectado, o que ocorreu na simulação.

Figura 37 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{ Hz}$ 

Fonte: Próprio autor.

O segundo ensaio (Figura 38), a carga se localiza muito próximo da fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize próximo a frequência limite para a detecção, que nesse caso é 61,5Hz, porém o resultado não foi muito preciso pois a frequência da tensão no PAC estabilizou em 61,4 Hz.

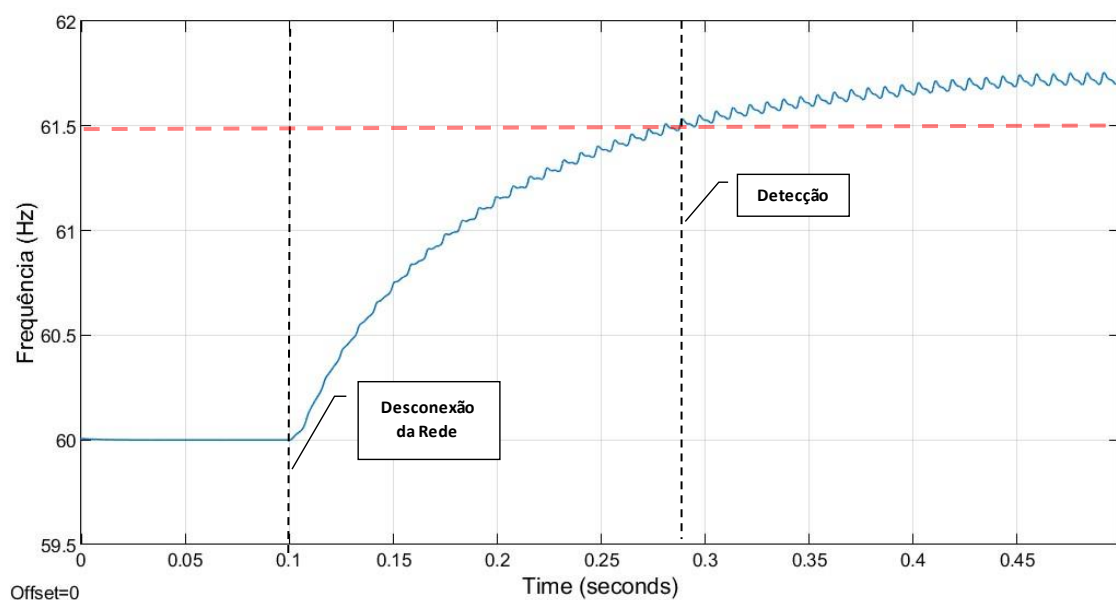
Figura 38 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,2$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O terceiro ensaio (Figura 39), a carga se localiza fora e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento foi detectado. A frequência estabilizou em 61,7 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

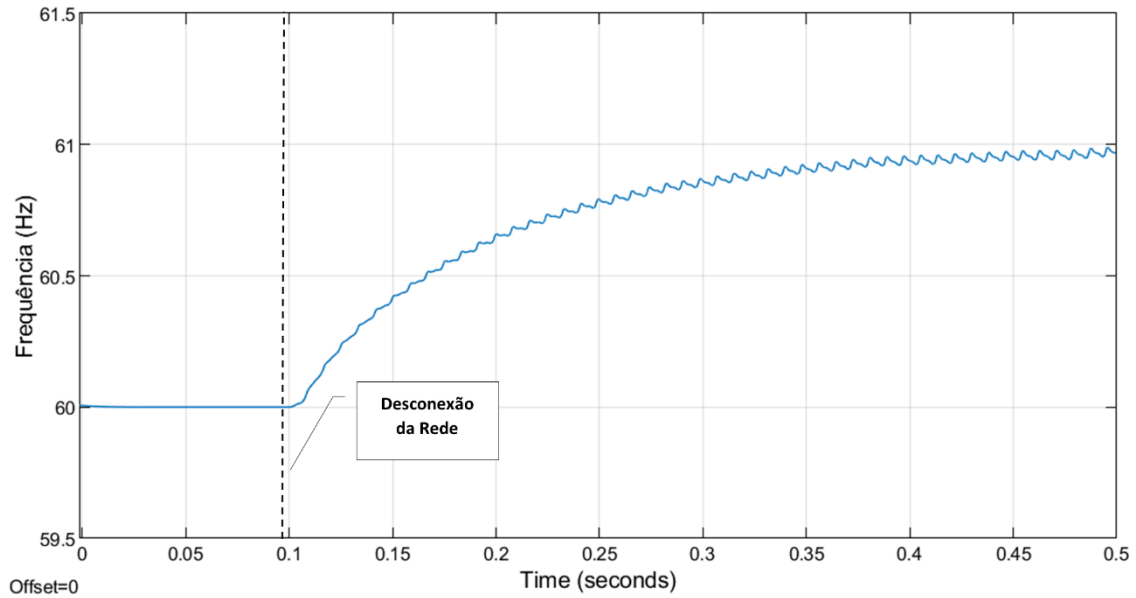
Figura 39 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,3$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O quarto ensaio (Figura 40), a carga se localiza dentro e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento não foi detectado. A frequência estabilizou em 61 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

Figura 40 – Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,1$ Hz

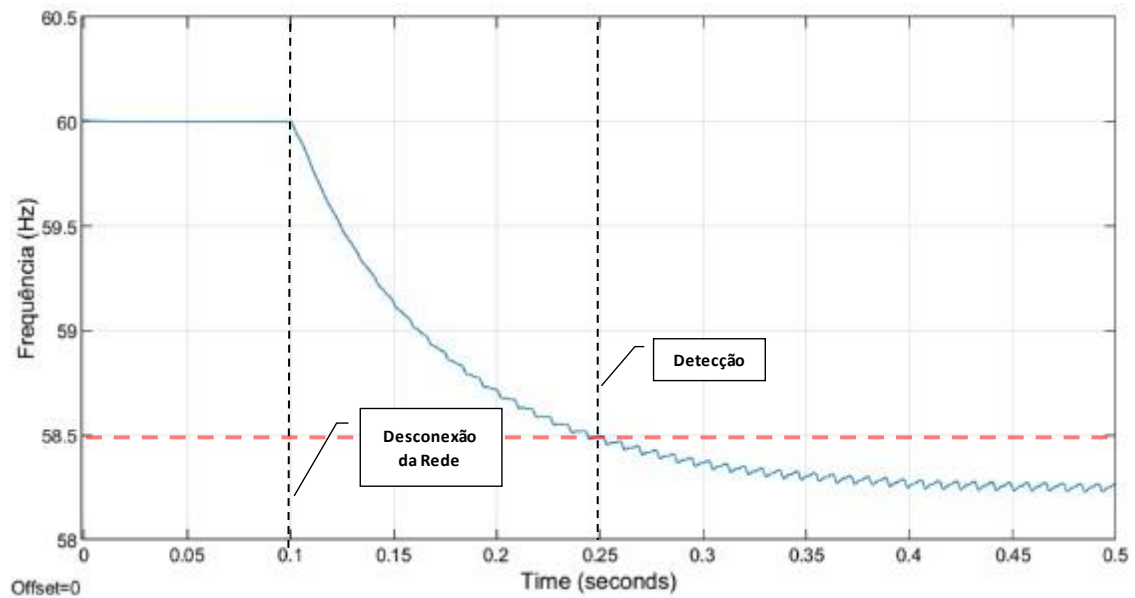


Fonte: Próprio autor.

O quinto ensaio (Figura 41), a carga se localiza muito próximo da fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize próximo a frequência limite inferior de 58,5 Hz, porém o resultado não foi muito preciso pois a frequência da tensão no PAC estabilizou em 58,3 Hz, aproximadamente.

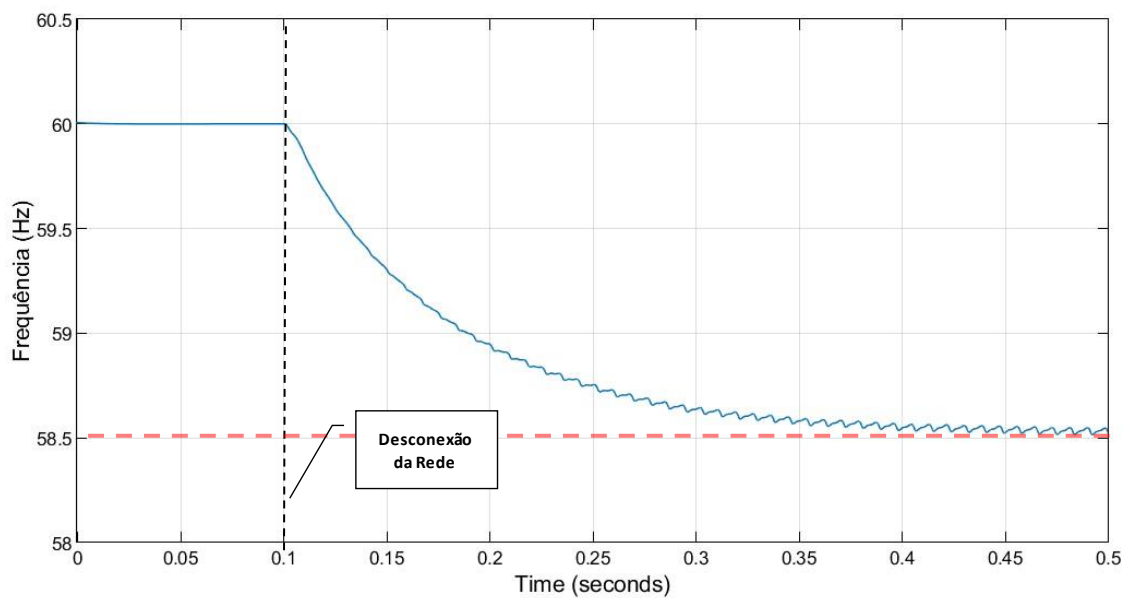
O sexto ensaio (Figura 42), a carga se localiza dentro e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento não foi detectado. A frequência estabilizou em 58,45 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

Figura 41 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,3$ Hz



Fonte: Próprio autor.

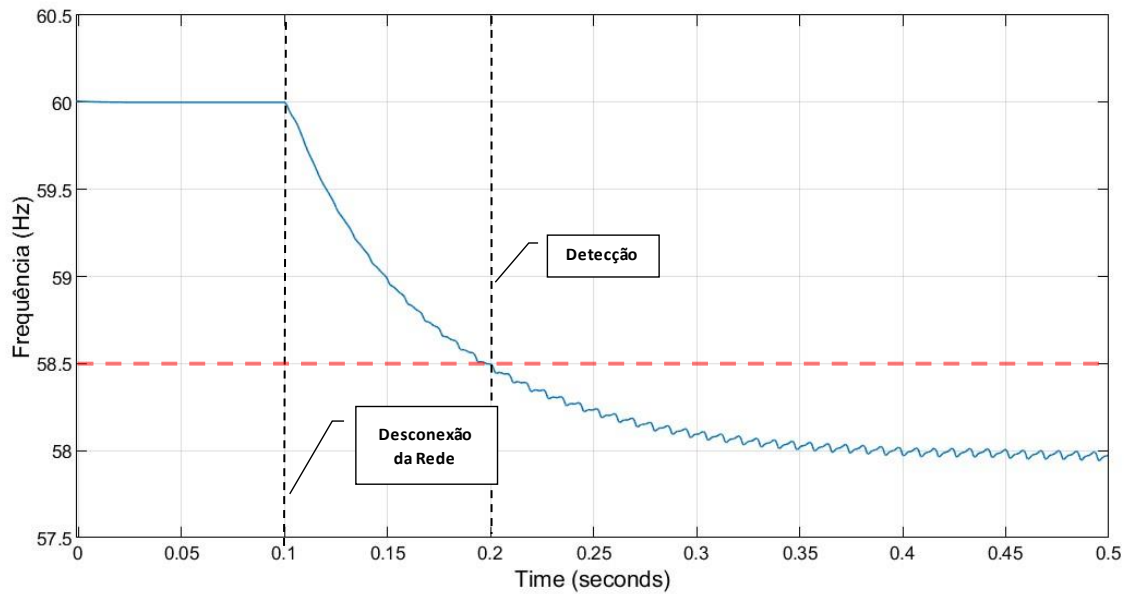
Figura 42 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4$ Hz



Fonte: Próprio autor.

O sétimo ensaio (Figura 43), a carga se localiza fora e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento foi detectado. A frequência estabilizou em 58 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

Figura 43 - -- Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,2$ Hz



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para o método SFS foram satisfatórios. O segundo e quinto ensaios comprovaram que cargas localizadas próximas à fronteira da ZND, o desvio da frequência estabiliza próximos as frequências de detecção, mesmo que não tenha sido preciso, igual como ocorreu no método AFD.

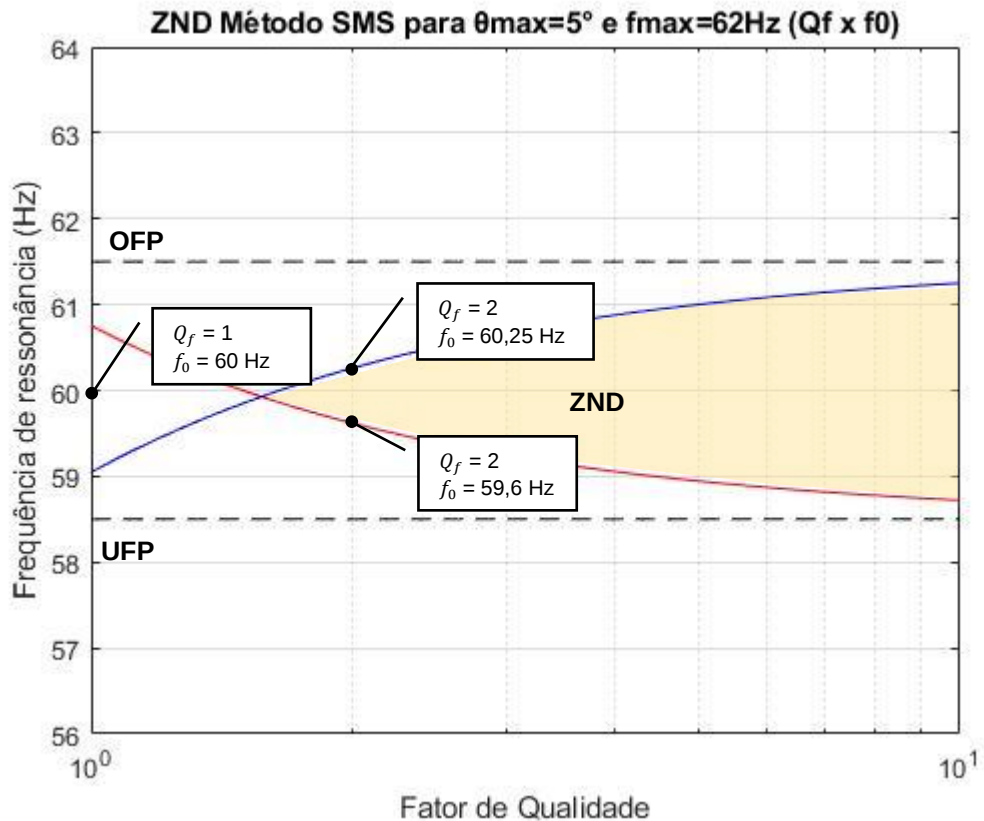
4.3 RESULTADOS DO MÉTODO SMS

Para esse método é possível eliminar a ZND para um dado Q_f escolhendo f_{max} e θ_{max} que satisfaçam a condição da equação (11). Para $Q_f = 1$ e $f_{max} = 62$ Hz, obteve-se $\theta_{max} \geq 2,432^\circ$. Foi escolhido o ângulo de fase máximo $\theta_{max} = 5^\circ$. Esses parâmetros são os mesmos parâmetros utilizados para calcular a ZND do método SMS, observada na Figura 10, que serviu como base na escolha das cargas utilizadas nas simulações.

Realizou-se um ensaio com a carga com os parâmetros $Q_f = 1$ e $f_0 = 60$ Hz e para observar o comportamento do método SMS com cargas próximas a fronteira na ZND, da mesma forma adotado no SFS, determinou-se cargas com o fator $Q_f = 2$ para a análise.

A partir da ZND calculada, as cargas com o parâmetro $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,25\text{Hz}$ e $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6\text{Hz}$ localizam-se, aproximadamente, sobre fronteira da ZND, como pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 - ZND do Método SMS com os pontos analisados



Fonte: Próprio autor.

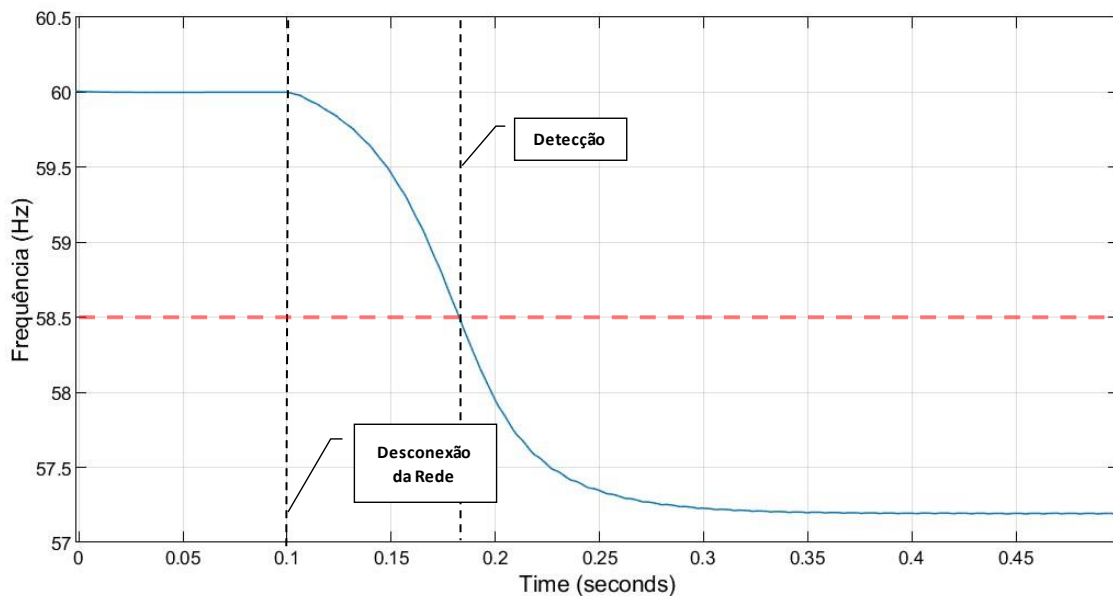
Para os dois pontos próximo à fronteira, $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,25\text{Hz}$ e $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6\text{Hz}$, foram realizadas mais duas simulações para cada. Para o ponto $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,25\text{Hz}$, mais duas simulações com a frequência a 0,1 Hz superior e outra com a frequência 0,1 Hz inferior. E para o ponto $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6\text{Hz}$, mais duas simulações com a frequência 0,2 Hz superior e outra com 0,2 Hz inferior. Na Tabela 5 estão as cargas utilizadas nos ensaios realizados e a localização da carga em relação a ZND.

Tabela 5 - Cargas dos ensaios do método SMS

Ensaio	Carga	ZND
1º	$Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{Hz}$	Fora
2º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,25\text{Hz}$	Fronteira
3º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,35\text{Hz}$	Fora
4º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 60,15\text{Hz}$	Dentro
5º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6\text{Hz}$	Fronteira
6º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,8\text{Hz}$	Dentro
7º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4\text{Hz}$	Fora

Fonte: Próprio autor.

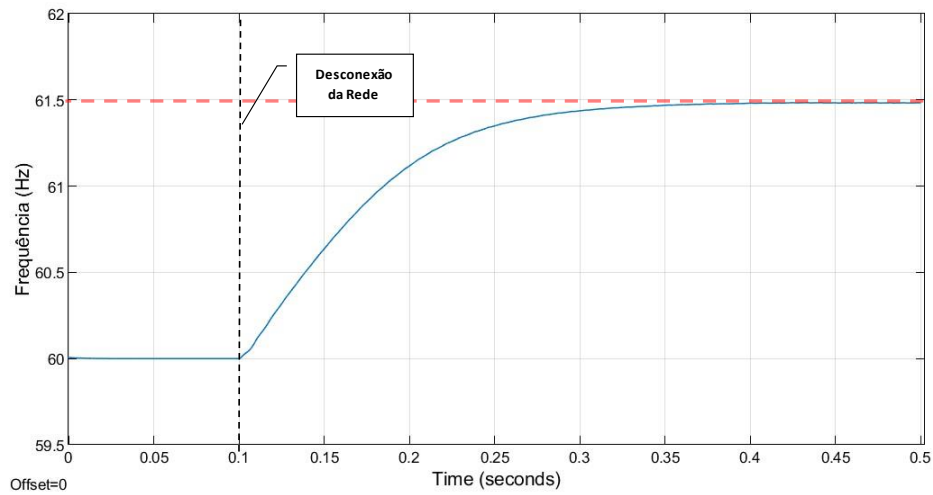
O primeiro ensaio (Figura 45), a carga se localiza fora da ZND, logo detectou o ilhamento 0,08 s após o ilhamento e estabilizou a frequência em 57,2 Hz, aproximadamente.

Figura 45 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{Hz}$ 

Fonte: Próprio autor.

O segundo ensaio (Figura 46), a carga se localiza próximo da fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize próximo a frequência limite superior de 61,5 Hz, o que ocorreu na simulação.

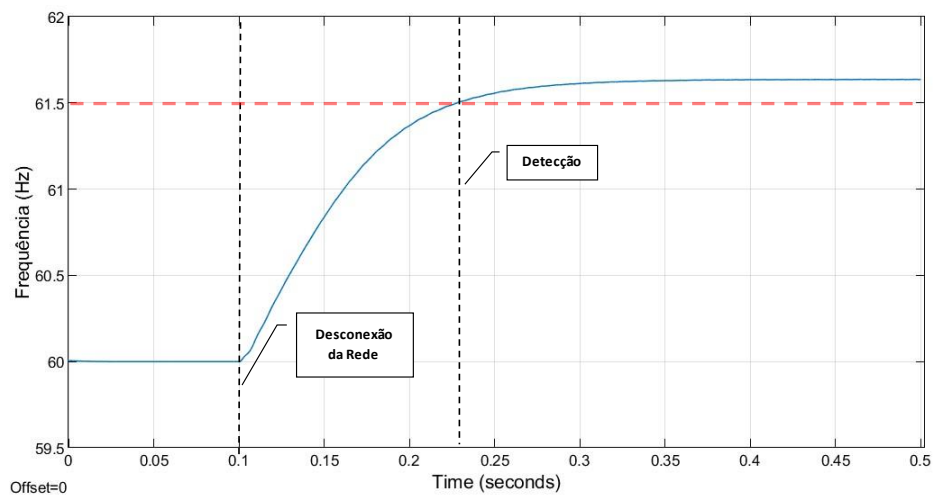
Figura 46 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,25 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O terceiro ensaio (Figura 47), a carga se localiza fora e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento foi detectado. A frequência estabilizou em 61,6 Hz e detectou o ilhamento. 0,13 s após a desconexão.

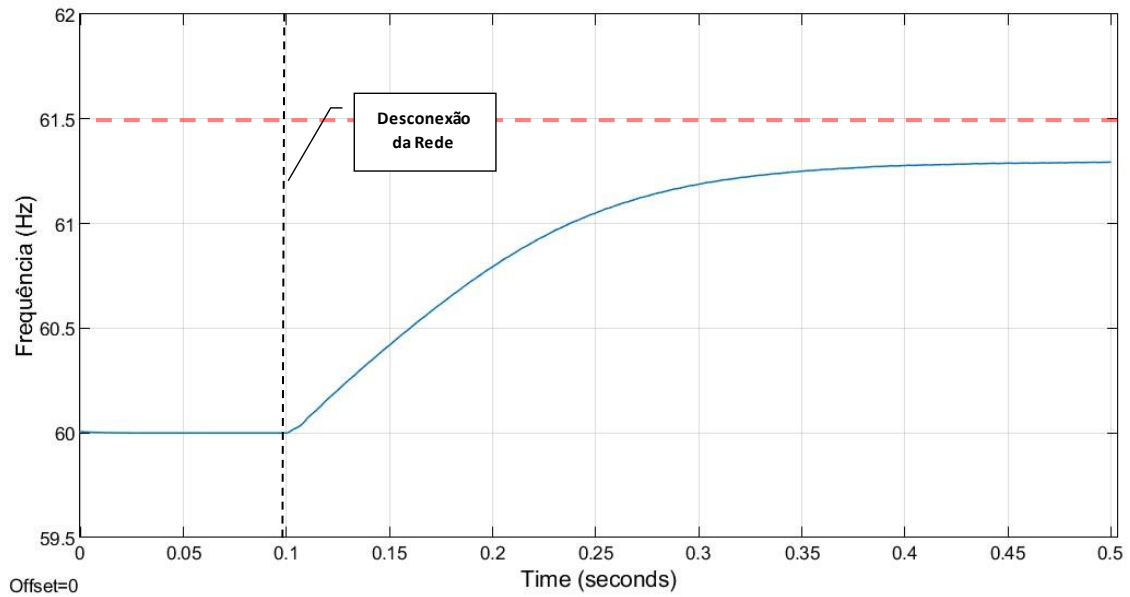
Figura 47 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,35 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O quarto ensaio (Figura 48), a carga se localiza dentro e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento não foi detectado. A frequência estabilizou em 61,3 Hz, aproximadamente, após o ilhamento

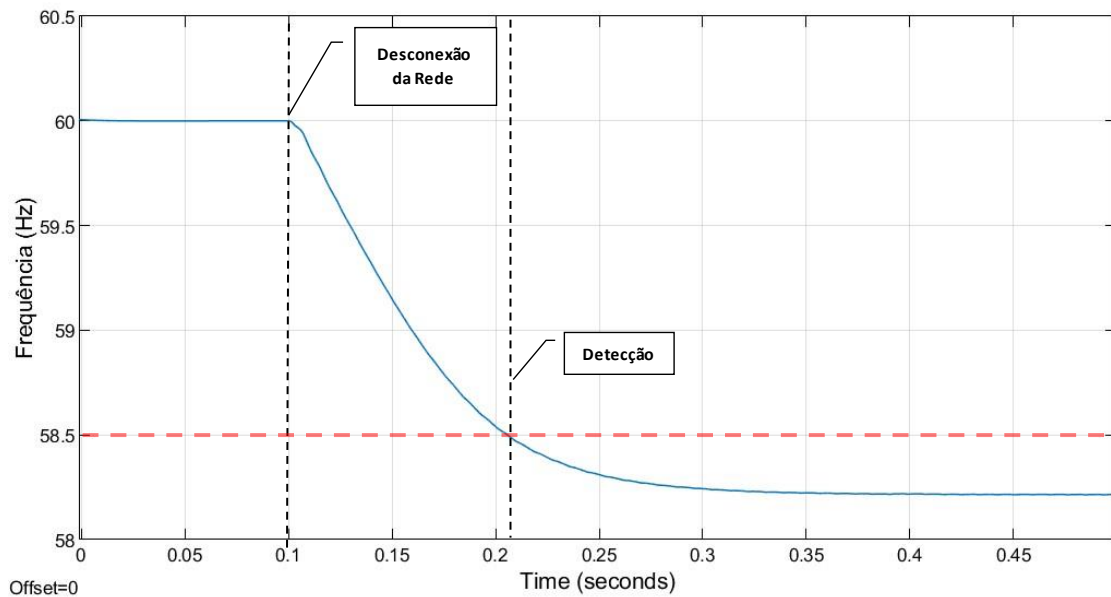
Figura 48 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 60,15\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O quinto ensaio (Figura 49), a carga se localiza próximo da fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize próximo a frequência limite inferior de 58,5 Hz, estabilizando em 58,3 Hz a frequência da tensão no PAC após o ilhamento.

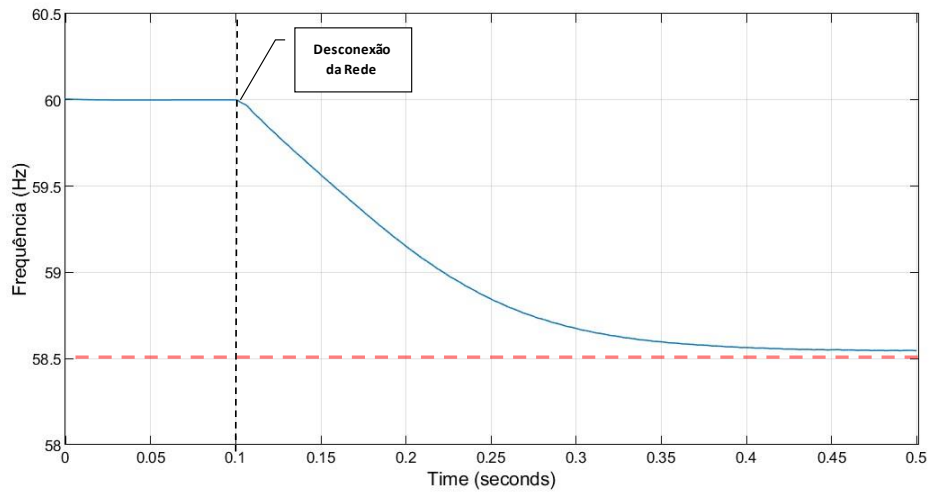
Figura 49 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6\text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

No sexto ensaio (Figura 50), a carga se localiza dentro e próximo ao limite da ZND, e como esperado, o ilhamento não foi detectado pelo método SMS. A frequência estabilizou em 58,4 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

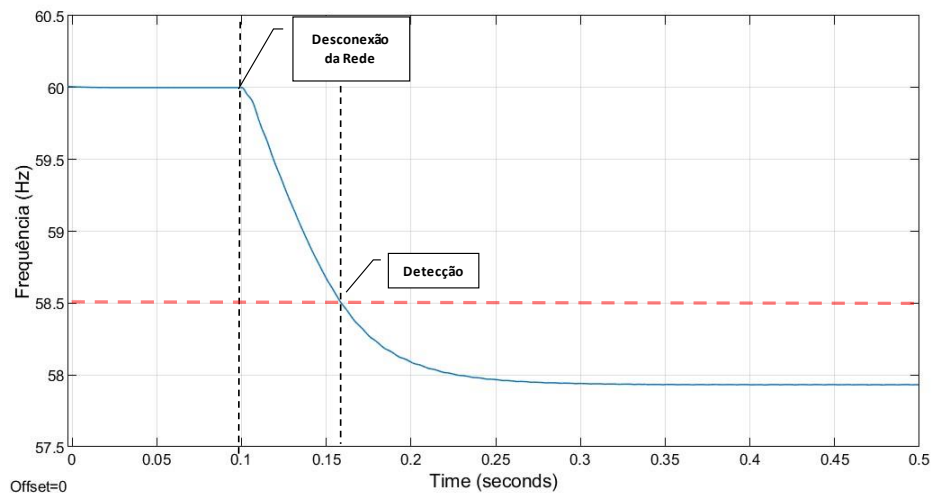
Figura 50 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,8 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

No sétimo ensaio (Figura 51), a carga se localiza fora e próximo ao limite da ZND, e como previsto o ilhamento foi detectado. A frequência estabilizou em 58 Hz e o método SMS detectou ilhamento em 0,06 s, após o ilhamento.

Figura 51 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para o método SMS foram satisfatórios. Deu para observar que quanto mais próximo da fronteira da ZND, a frequência da tensão do PAC tende a estabilizar próximo aos valores da frequência limite de 61,5 ou 58,5 Hz. Além disso, pelos resultados do quinto e sétimos ensaios (Figura 49 e Figura 51), quanto mais afastado o ponto está da ZND, maior é o desvio da frequência e consequentemente mais rápido é a detecção do ilhamento.

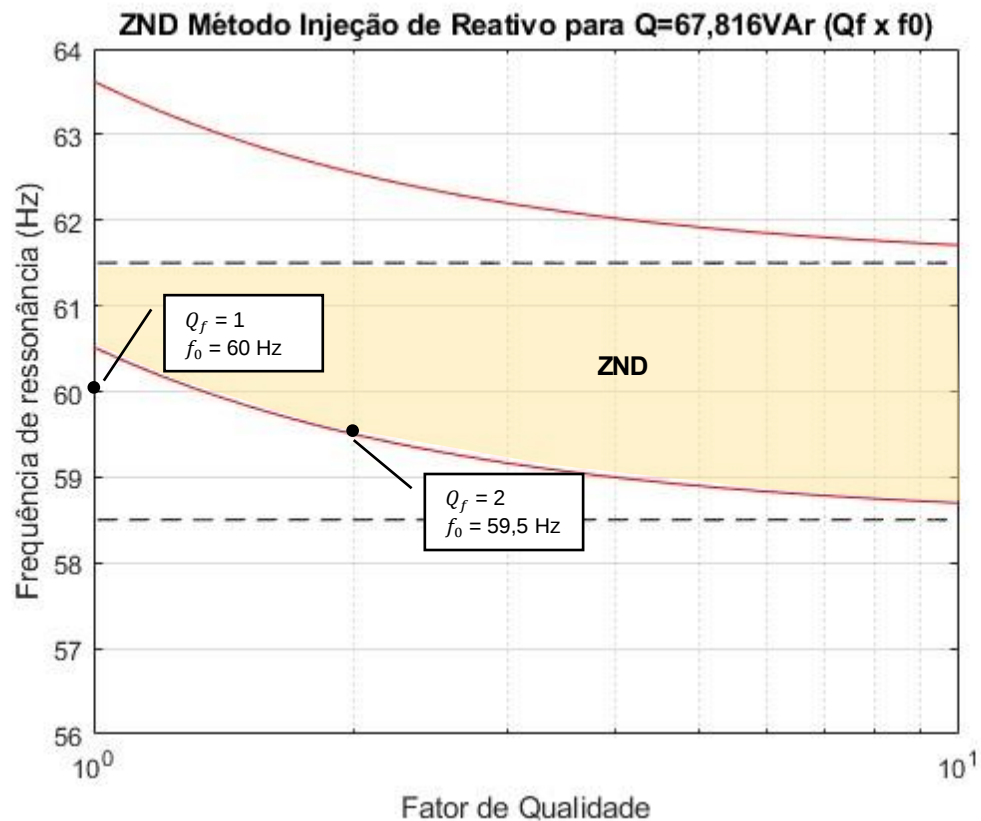
4.4 RESULTADOS DO MÉTODO INJEÇÃO DE REATIVO

Utilizando a equação (14), onde a potência ativa $P = 1000 \text{ W}$, o fator de qualidade $Q_f = 1$, a frequência de ressonância $f_0 = 60 \text{ Hz}$ e estabelecido a frequência do após o ilhamento $f_i = 58 \text{ Hz}$, o valor da potência reativa calculado é $Q = 67,816 \text{ VAR}$. Para valores de variação de potência reativa maiores, pode haver um maior descasamento da potência, o que significa uma maior variação na frequência. Com o valor de $Q = 67,816 \text{ VAR}$, a frequência estabiliza em 58 Hz. Esses parâmetros são os mesmos utilizados para calcular o ZND, ilustrada na Figura 11.

Realizou-se um ensaio com a carga com os parâmetros $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$ e para observar o comportamento do método Injeção de Reativo com cargas próximas a fronteira na ZND, determinou-se cargas com o fator $Q_f = 2$ para a análise. A partir da ZND calculada, a carga com o parâmetro $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,5 \text{ Hz}$ localiza-se, aproximadamente, sobre fronteira da ZND, como pode ser observado na Figura 52.

Para o ponto $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,5 \text{ Hz}$, foram realizadas mais duas simulações com a frequência a 0,1 Hz superior e outra com a frequência 0,1 Hz inferior. Na Tabela 6 estão as cargas utilizadas nos ensaios realizados e a localização da carga em relação a ZND.

Figura 52 - ZND do Método Injeção de Reativo com os pontos analisados



Fonte: Próprio autor.

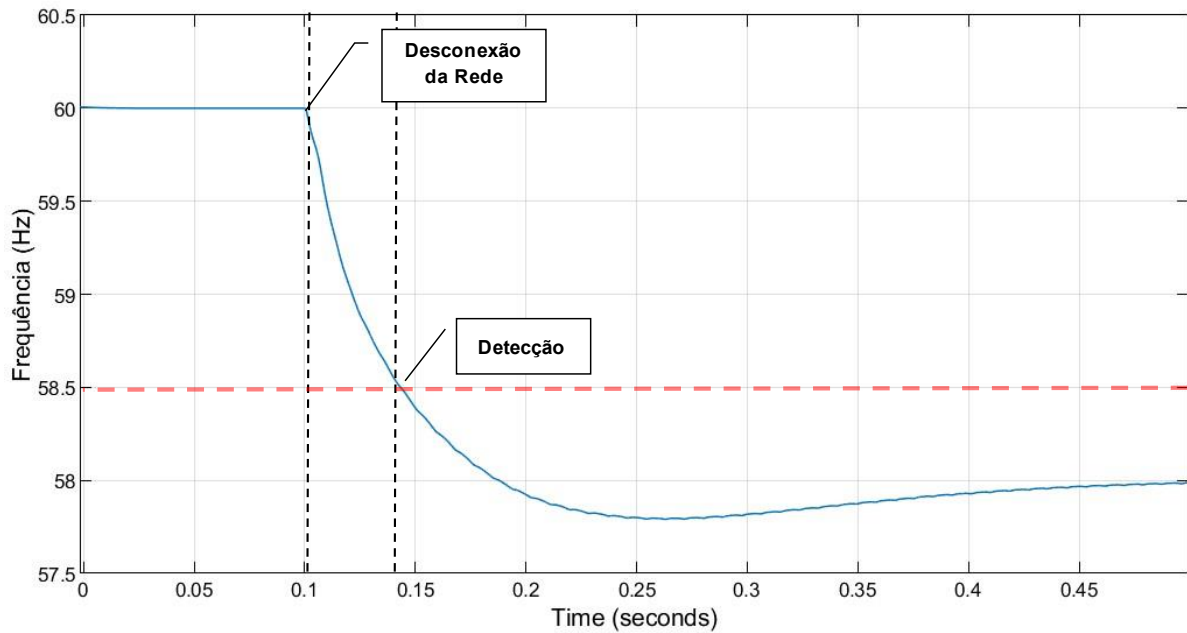
Tabela 6 - Cargas dos ensaios do método Injeção de Reativo

Ensaio	Carga	ZND
1º	$Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{Hz}$	Fora
2º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,5 \text{ Hz}$	Fronteira
3º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6 \text{ Hz}$	Dentro
4º	$Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4 \text{ Hz}$	Fora

Fonte: Próprio autor.

No primeiro ensaio (Figura 53), com o valor de $Q = 67,816 \text{ VAr}$, a frequência estabiliza em 58Hz após o ilhamento, como esperado.

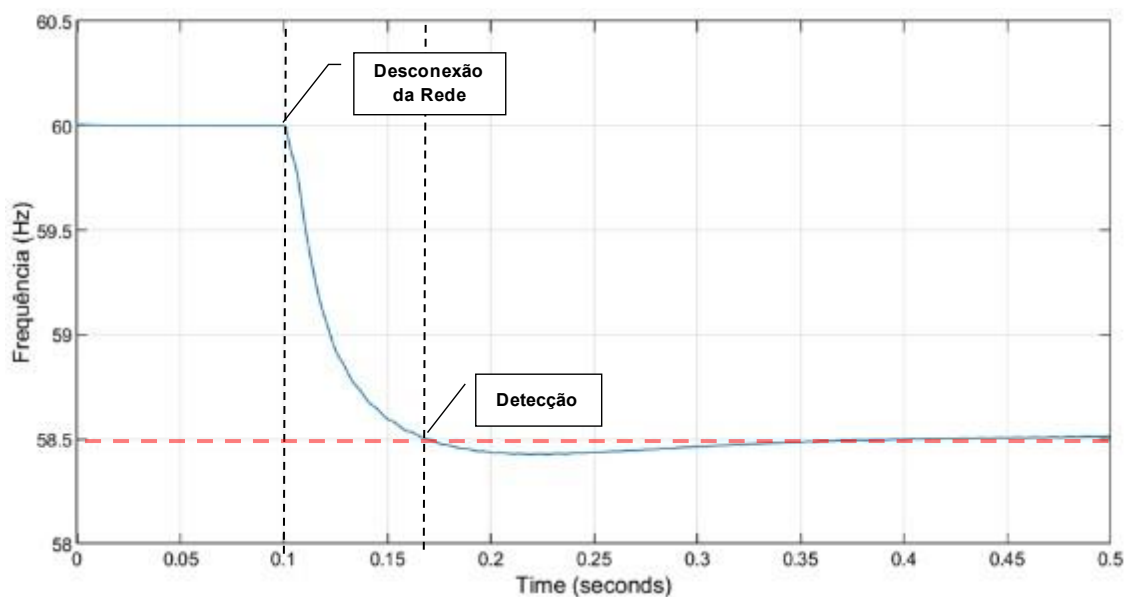
Figura 53 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 1$ e $f_0 = 60\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O segundo ensaio (Figura 54), a carga se localiza na fronteira da ZND, o esperado é a frequência após o ilhamento se estabilize na frequência limite inferior de 58,5 Hz, o que ocorreu na simulação de forma precisa.

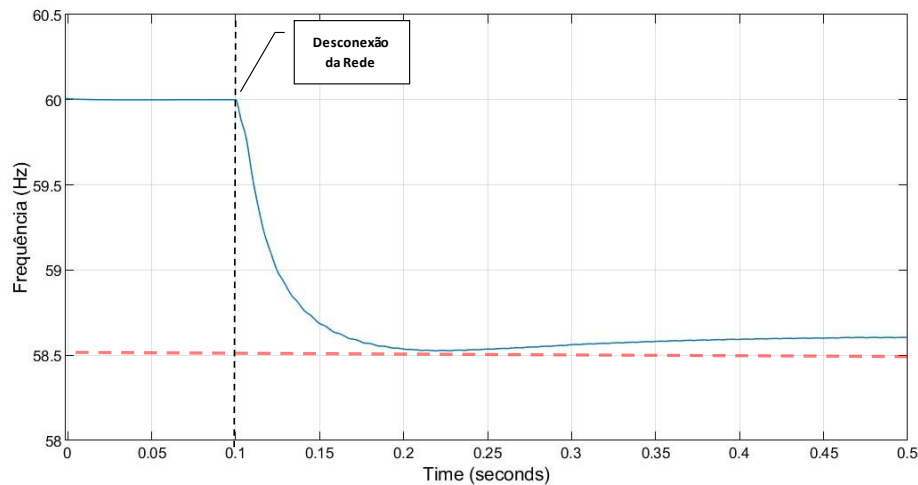
Figura 54 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,5\text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O terceiro ensaio (Figura 55), a carga localiza dentro da ZND, porém próximo da fronteira da ZND, logo se espera que o método Injeção de Reativo não detecte o ilhamento, o que ocorreu na simulação, com a frequência da tensão no PAC estabelecendo em 58,6 Hz, aproximadamente, após o ilhamento.

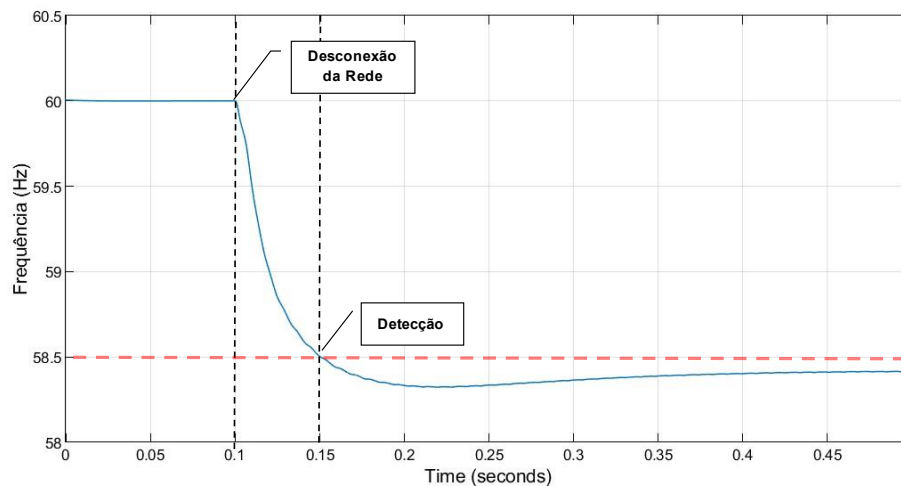
Figura 55 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,6 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

O quarto e último ensaio (Figura 56), a carga se localiza fora da ZND, mas próximo da fronteira da ZND, por esse motivo se espera que o método Injeção de Reativo detecte o ilhamento, o que ocorreu na simulação, com a frequência estabelecendo em 58,4 Hz, aproximadamente, após a retira da rede no instante 0,1 s.

Figura 56 - Mudança de frequência após o ilhamento com a carga RLC com $Q_f = 2$ e $f_0 = 59,4 \text{ Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para o método Injeção de Reativo são satisfatórios pois os resultados foram como o previsto.

4.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios para os métodos de Desvio Ativo de Frequência (AFD), Desvio Ativo de Frequência com Realimentação Positiva (SFS), Desvio de Frequência no Modo Escorregamento (SMS) e Injeção de Reativo. Para os quatro métodos foram realizados ensaios para a carga de $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$. Além disso, foram escolhidos pontos localizados próximo as fronteiras da ZND de cada método.

Os resultados comprovaram pelas simulações que os as estratégias adotadas para cada método, apresentados no item 3.2, funcionavam e que as ZND, calculadas no item 2.4.3, estavam coerentes. Por uma questão de comparação na Tabela 7 pode-se observar os o tempo de detecção de ilhamento para os quatro métodos para a carga de $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$. Esse ponto foi escolhido, pois os métodos avaliados foram configurados para que não houvesse ZND nesse ponto, com isso era de se esperar que o ilhamento fosse detectado.

Tabela 7 - Detecção dos métodos anti-ilhamento para carga $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$

Método	Frequência de detecção	Tempo de Detecção	Tamanho da ZND
AFD	61,5 Hz	0,03 s	Grande
SFS	61,5 Hz	0,27 s	Pequeno
SMS	58,5 Hz	0,08 s	Pequeno
Injeção de Reativo	58,5 Hz	0,04 s	Grande

Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foram analisados quatro métodos anti-ilhamentos ativos (AFD, SFS, SMS e Injeção de Reativo) e mapeadas as ZND utilizando-se fator de qualidade e a frequência de ressonância da carga como parâmetros, a fim de observar as zonas de não detecção de cada método anti-ilhamento aplicado. Foram simuladas a configuração de carga com $Q_f = 1$ e $f_0 = 60 \text{ Hz}$ para os quatro métodos anti-ilhamento e foram escolhidas cargas localizadas próximas às fronteiras das ZND de cada método, de acordo com a zona de não detecção calculada. Todas as simulações foram implementadas no software Simulink.

Os resultados obtidos nas simulações do método AFD foram de acordo com o mapeamento da ZND realizada. Pode-se observar que cargas com fatores de qualidade maiores, o desvio da frequência após o ilhamento é menor, dificultando a detecção do ilhamento. Os resultados obtidos nas simulações do método SFS também foram de acordo com o mapeamento da ZND calculada. A partir dos resultados observados pelas simulações, foi possível constatar que o método AFD é menos eficaz do que o método SFS, quanto ao tamanho da ZND, pois apesar do método de desvio ativo de frequência com realimentação positiva possuir um fator de corte menor do que o AFD, sua zona de não detecção é menor devido a realimentação positiva. Para o método SMS, houve um caso de detecção de ilhamento com a carga de parâmetros localizados dentro da ZND. Isso indica que os modelos analisados neste trabalho não possuem alta precisão. Tirando isso, como o método SMS também possui realimentação positiva, esse método é superior ao método AFD, quanto ao tamanho da ZND, possuindo uma zona de não detecção semelhante ao SFS. Por fim, os resultados obtidos nas simulações do método Injeção de Reativo foram de acordo com o mapeamento da ZND realizada. Esse método possui uma zona de não detecção semelhante à do método AFD, porém um ponto negativo é que ele acaba diminuindo o fator de potência. Em suma, os métodos SFS e SMS se apresentam como boas soluções pois a utilização da realimentação positiva possibilita um baixo distúrbio na rede e ZND reduzida.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. P. **QUALIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**. [S.l.]. 2012.
- ANEEL. **PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição - Revisão 7**. [S.l.]. 2017.
- BOWER, W.; ROPP, M. Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems. **SANDIA REPORT**, 2002.
- BRITO, M. A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. UNESP. Ilha Solteira. 2013.
- BRITO, M. A. G. et al. Estratégias de Anti-Ilhamento Aplicadas a Sistemas de Geração Distribuída Fotovoltaica. **Eletrônica Potência**, Joinville, v. 23, p. 226-234, abril 2018.
- ESTÉBANEZ, E. J. et al. Performance Evaluation of Active Islanding-Detection Algorithms in Distributed-Generation Photovoltaic Systems: Two Inverters Case. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 58, Abril 2011.
- HONGKAI, L. et al. Green Power Generation Technology for Distributed Power Supply. **IEEE**, 2008.
- IAE, I. E. A.-. Data and statistics. **IAE**, Dezembro 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=BRAZIL&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>>.
- LI, X.; BALOG, R. S. Analysis and comparison of two active anti-islanding detection methods. **IEEE**, 2014.
- MARCHESAN, G. **Detecção de Ilhamento em Sistemas de Distribuição com Geração Síncrona Distibuida**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 129. 2016.
- MARTINS DA SILVEIRA, E. **Estudo de Técnicas Anti-Ilhamento Ativas e Passivas com Foco na Redução da Zona de Não-Detecção**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Itumbiara. 2020.
- PUPO, A. D. **ESTUDO DE METODOLOGIAS DE PROJETOS PARA FILTROS DE SAÍDA DE INVERSORES**. Universidade Tecnologia Federal do Paraná. Pato Branco. 2015.
- REIS, M. V. G. et al. Active Frequency Drift with Positive Feedback Anti-islanding for a Single Phase Two-stage Grid-tied Photovoltaic System, 2015.
- RESENDE, Ê. C. et al. A Performance Analysis of Active Anti-Islanding Methods Based on Frequency Drift. **IEEE**, 2019.
- RICCIARDI, T. R. **Análise do Impacto da Proteção Antiilhamento na Estabilidade de Geradores Conectados Via Inversores**. UNICAMP. Campinas. 2010.
- ROPP, M. E. et al. **Determining the Relative Effectiveness of Islanding Detection Methods Using Phase Criteria and Nondetection Zones**. [S.l.]. 2000.

SAMPAIO, L. P. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade.** Ilha Solteira. 2013.

SILVA, H. T. **Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2016.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems.** Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

ZEINELDIN, H. H.; KENNEDY, S. Sandia Frequency-Shift Parameter Selection to Eliminate Nondetection Zones. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 24, n. 1, Janeiro 2009.

APÊNDICE A – Código fonte utilizados

ZND DO MÉTODO AFD

```
clear all

Qf = 0.01:0.01:100;
cf=0.0625;
fmin=58.5;
fmax=61.5;
teta_AFD = pi*cf./2;

f0min = ((fmin*tan(-teta_AFD)./Qf)+sqrt(((fmin*tan(-
teta_AFD)./Qf).^2)+4*fmin.^2))./2;
f0max = ((fmax*tan(-teta_AFD)./Qf)+sqrt(((fmax*tan(-
teta_AFD)./Qf).^2)+4*fmax.^2))./2;

semilogx(Qf,f0min,'red',Qf,f0max,'red');

hold on
UFP = ((fmin*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmin*tan(0)./Qf).^2)+4*fmin.^2))./2;
OFP = ((fmax*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmax*tan(0)./Qf).^2)+4*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,UFP,'black--',Qf,OFP,'black--');
hold off

grid on
ylim([56 64])
xlim([1 10])
title('ZND Método AFD para cf=0,0625 (Qf x f0)')
xlabel('Fator de Qualidade')
ylabel('Frequência de ressonância (Hz)')
```

ZND DO MÉTODO SFS

```
clear all

Qf = 0.01:0.01:100;
fn =60;
fmin=58.5;
fmax=61.5;

k=0.03;
cf0= 0.01;

f0min = ((fmin.*tan(-pi.*(cf0+k.*(fmin-fn))/2)./Qf)+sqrt(((fmin.*tan(-
pi.*(cf0+k.*(fmin-fn))/2)./Qf).^2)+4.*fmin.^2))./2;
f0max = ((fmax.*tan(-pi.*(cf0+k.*(fmax-fn))/2)./Qf)+sqrt(((fmax.*tan(-
pi.*(cf0+k.*(fmax-fn))/2)./Qf).^2)+4.*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,f0min,'blue',Qf,f0max,'red')

hold on
UFP = ((fmin*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmin*tan(0)./Qf).^2)+4*fmin.^2))./2;
OFP = ((fmax*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmax*tan(0)./Qf).^2)+4*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,UFP,'black--',Qf,OFP,'black--');
hold off
```

```

grid on
ylim([56 64])
xlim([1 10])
title('ZND Método SFS para cf0=0,01 e K=0,03 (Qf x f0)')
xlabel('Fator de Qualidade Qf')
ylabel ('Frequência de ressonância (Hz)')

```

ZND DO MÉTODO SMS

```

clear all

Qf = 0.1:0.01:100;
fn=59.9;
fmaxima = 62;
teta_max = 5*pi/180;

fmin=58.5;
fmax=61.5;

f0min = ((fmin.*tan(-teta_max.*sin((pi/2).*(fmin-fn)./(fmaxima-
fn)))./Qf)+sqrt(((fmin.*tan(-teta_max.*sin((pi/2).*(fmin-fn)./(fmaxima-
fn)))./Qf).^2)+4.*fmin.^2))./2;
f0max = ((fmax.*tan(-teta_max.*sin((pi/2).*(fmax-fn)./(fmaxima-
fn)))./Qf)+sqrt(((fmax.*tan(-teta_max.*sin((pi/2).*(fmax-fn)./(fmaxima-
fn)))./Qf).^2)+4.*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,f0min,'red',Qf,f0max,'blue')

hold on
UFP = ((fmin*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmin*tan(0)./Qf).^2)+4*fmin.^2))./2;
OFP = ((fmax*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmax*tan(0)./Qf).^2)+4*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,UFP,'black--',Qf,OFP,'black--');
hold off

grid on
ylim([56 64])
xlim([1 10])
title('ZND Método SMS para ?max=5° e fmax=62Hz (Qf x f0)')
xlabel('Fator de Qualidade')
ylabel ('Frequência de ressonância (Hz)')

```

ZND DO MÉTODO INJEÇÃO DE REATIVO

```
clear all

Qf = 0.1:0.1:100;
Q = 67.816;
P = 1000;

fmin=58.5;
fmax=61.5;
f0min = (Q.*fmin+sqrt(fmin.^2.*(Q^2+4*P^2.*Qf.^2)))./(2*P.*Qf);
f0max = (Q.*fmax+sqrt(fmax.^2.*(Q^2+4*P^2.*Qf.^2)))./(2*P.*Qf);
semilogx(Qf,f0min,'red',Qf,f0max,'red');

hold on
UFP = ((fmin*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmin*tan(0)./Qf).^2)+4*fmin.^2))./2;
OFP = ((fmax*tan(0)./Qf)+sqrt(((fmax*tan(0)./Qf).^2)+4*fmax.^2))./2;
semilogx(Qf,UFP,'black--',Qf,OFP,'black--');
hold off

grid on
ylim([55 65])
xlim([0.1 10])
title('ZND Método Injeção de Reativo para Q=67,816VAR (Qf x f0)')
xlabel('Fator de Qualidade')
ylabel('Frequência de ressonância (Hz)')
```