

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIO HENRIQUE GUSO

**SOLUÇÕES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA CLIENTES
INDUSTRIAIS**

CURITIBA

2022

FABIO HENRIQUE GUSSO

**SOLUÇÕES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA CLIENTES
INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista, Curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Duarte
Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi
Aoki

CURITIBA

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA -
40001016317E1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Monografia de Especialização de FABIO HENRIQUE GUSSO intitulada: SOLUÇÕES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA CLIENTES INDUSTRIAIS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de especialista está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 4 de março de 2022.

Mateus Duarte Teixeira

Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. MATEUS DUARTE TEIXEIRA
Docente do Departamento de Eng. Elétrica
Matrícula UFPR 203334

Rogers Demonti

Prof. Dr Rogers Demonti
Docente do Depto. de Engenharia Elétrica
Matrícula: UFPR 201875

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal do Paraná pela dedicação e comprometimento em compartilhar o conhecimento, mesmo em tempos de restrições que enfrentamos durante esse período de pandemia. Agradeço especialmente o meu orientador Professor Doutor Mateus Duarte Teixeira e ao coorientador Professor Doutor Alexandre Rasi Aoki pelo profissionalismo e atenção no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Os consumidores do grupo A, ao instalar um sistema de geração fotovoltaica, arcam com uma diminuição do fator de potência da sua instalação. Este estudo tem o objetivo de facilitar a tomada de decisão de um consumidor do grupo A, a partir do momento em que este se torna um gerador distribuído de energia fotovoltaica e se depara com tarifas extras por excedente de reativos na sua unidade. Com simulações computacionais e análise de *payback* de unidades consumidoras de 5 demandas contratadas distintas, com diferentes fatores de potência pré-existentes, instalando usinas fotovoltaicas de potências comuns no mercado, foi possível concluir que, caso haja tarifação por excedente de reativos, a melhor solução custo-benefício é a instalação de banco de capacitores puro, porém como ela tem probabilidade de trazer riscos à instalação, tecnicamente a melhor medida a ser adotada é a instalação de um banco de capacitores com um filtro dessintonizado.

Palavras-chave

Energia Fotovoltaica, fator de potência, banco de capacitores, qualidade de energia, eficiência energética.

ABSTRACT

Consumers in group A, when installing a photovoltaic generation system, bear a reduction in the power factor of their installation. This study aims to facilitate the decision making of a group A consumer, from the moment he becomes a distributed photovoltaic energy generator and is faced with extra charges for excess reactive in his unit. With computer simulations and payback analysis of consumer units of 5 different contracted demands, with different pre-existing power factors, installing photovoltaic plants of common powers in the market, it was possible to conclude that, if there is a tariff for excess of reactive, the best solution is cost-effective is the installation of a pure capacitor bank, but as it is likely to bring risks to the installation, technically the best measure to be adopted is the installation of a capacitor bank with a detuned filter.

Keywords

Photovoltaic, power factor, capacitor bank, power quality, power efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Composição setorial do consumo de eletricidade	11
Figura 2: Mudança do FP da instalação após inserção de geração distribuída	16
Figura 3: Curva de Capabilidade do inversor fotovoltaico	18
Figura 4: Diagrama Esquemático das unidades consumidoras.....	23
Figura 5: fatura de energia da Copel com tarifação por excedente de reativos	25
Figura 6: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96.....	29
Figura 7: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94	30
Figura 8: fp resultante para UCs com fp inicial 0,92.....	31
Figura 9: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96 após ajustar fp do inversor para 0,99.....	32
Figura 10: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94 após ajustar fp do inversor para 0,96	33
Figura 11: fp resultante para UCs com fp inicial de 0,92 após ajustar fp do inversor para 0,92	34
Figura 12: diagrama do sistema com banco de capacitores puro	35
Figura 13: Impedância $Z(w)$ da barra da Unidade Consumidora.....	36
Figura 14: diagrama do sistema com banco de capacitores e filtro dessintonizado	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: ordens harmônicas injetadas pelo sistema fotovoltaico.....	24
Tabela 2: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré existente de 0,96.....	26
Tabela 3: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré-existente de 0,94.....	27
Tabela 4: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré-existente de 0,92.....	27
Tabela 5: Valores de referência de usinas fotovoltaicas	28
Tabela 6: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96	29
Tabela 7: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94	30
Tabela 8: fp resultante para UCs com fp inicial 0,92	31
Tabela 9: resultados da qualidade de energia após instalação de banco de capacitor puro.....	36
Tabela 10: resultados da qualidade de energia após instalação de banco de capacitor com filtros	38

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO	11
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	OBJETIVO GERAL	13
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ANÁLISE DA REN 482/2012	15
2.2	FATOR DE POTÊNCIA	15
2.3	DIMINUIÇÃO DO FP COM INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA 16	
2.3.1	CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	16
2.4	GERAÇÃO DE HARMÔNICAS PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO	17
2.5	MÉTODOS PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	18
2.5.1	AJUSTE DO FP DO(S) INVERSOR(ES)	18
2.5.2	BANCOS DE CAPACITORES PUROS	19
2.5.3	BANCOS DE CAPACITORES COM REATOR DE SINTONIA E DESSINTONIA	19
2.6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	26
4.1	AJUSTE DO FATOR DE POTÊNCIA DOS INVERSORES	26
4.2	BANCO DE CAPACITORES PURO	34
4.3	BANCO DE CAPACITORES COM FILTROS	37
5	CONCLUSÕES	39

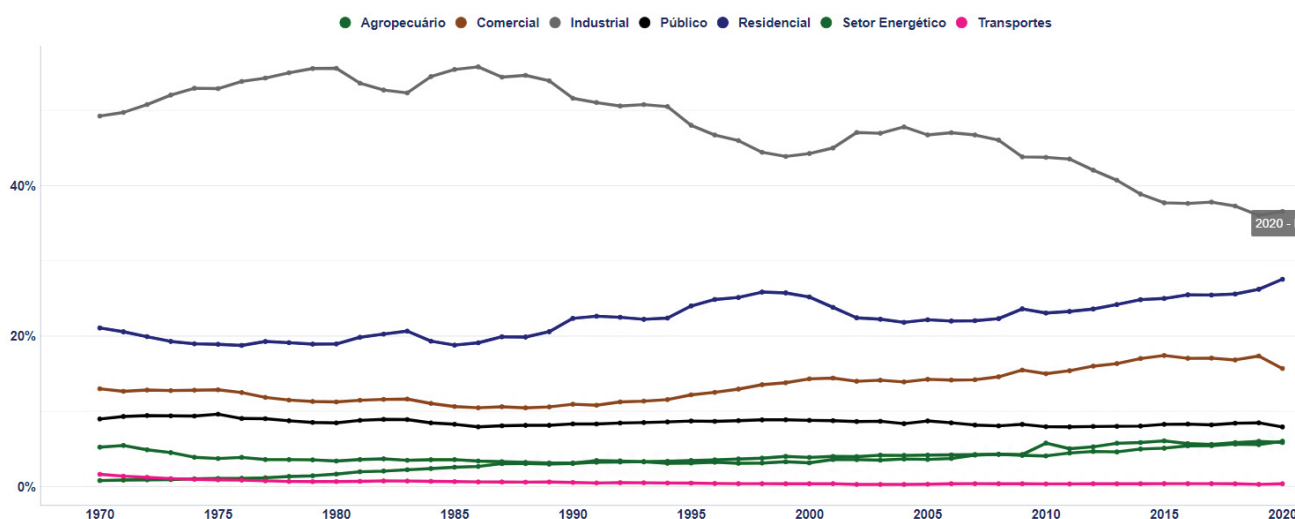
REFERÊNCIAS.....	40
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Mesmo em queda percentual desde os anos 80, como se pode perceber pela Figura 1, o setor industrial brasileiro só tem aumentado seu consumo ano após ano. Essa queda percentual se deve ao aumento do consumo pelos setores residencial e comercial (em azul e marrom, respectivamente). Atualmente, o setor industrial representa mais de um terço de todo o consumo de energia elétrica do país com a maior parcela desse consumo sendo de unidades atendidas em média tensão. Em contrapartida a terem uma tarifa mais baixa sobre a energia consumida, é exigido desses consumidores que tenham maior planejamento a respeito das suas instalações elétricas, uma vez que têm uma representatividade muito significativa perante o dimensionamento do sistema elétrico nacional.

Figura 1: Composição setorial do consumo de eletricidade



FONTE: BEN Interativo, 2021

Todos os consumidores do grupo A (atendidos em média tensão) estão sujeitos a encargos extras por baixa eficiência na sua instalação elétrica. Segundo a resolução 414, de 2010, da ANEEL, todas as instalações devem ter um fator de potência (FP) igual ou superior a 0,92. Caso esse valor ultrapasse o

limite, o consumidor será cobrado em um valor adicional no valor do seu kWh, proporcional ao decréscimo do fp da sua instalação.

Dentro desse contexto de uso da energia elétrica na indústria, há uma necessidade de se viabilizar ainda mais a inserção de consumidores do grupo A no âmbito da geração distribuída, não apenas oferecendo o sistema de geração de energia, mas apresentando soluções mais completas e economicamente mais viáveis para mitigar complicações que podem surgir acerca do fator de potência da instalação, do ponto de vista da concessionária, ao se diminuir a potência ativa consumida da rede, uma vez que estes sistemas baseiam-se, em sua maioria, em inversores fotovoltaicos, os quais, apesar de possuírem capacidade de controlar o FP e a potência reativa de saída, por motivos econômicos, operam geralmente com $FP=1,00$ pu.

Melhorar o fator de potência das instalações não só é benéfico para o consumidor, que evita encargos extras desnecessários, como também para o sistema elétrico, que dispõe de maior eficiência nos fluxos de potência. Medidas simples para melhorar o fator de potência como ajustar a injeção ou o consumo de energia reativa através de um inversor fotovoltaico, como comentado, ou a instalação de bancos de capacitores podem diminuir as correntes elétricas circulantes pela rede, evitando perdas elétricas ou o sobredimensionamento de condutores. No entanto, essas medidas representam custos para o *prosumidor* (neologismo resultante da junção dos termos “produtor” e “consumidor”, no setor energético)

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar técnica e economicamente o uso de soluções passivas de correção do fator de potência (FP) de instalações elétricas do Grupo A com a presença de GD.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Auxiliar a tomada de decisão de investidores para enfrentar um possível inconveniente recorrente na literatura acadêmica atual;
- b) Analisar soluções tecnológicas para inserção de geração de energia renovável em ambiente industrial;
- c) Levantar dados para estudo de caso;
- d) Especificar soluções passivas como bancos de capacitores e filtros harmônicos dessintonizados e sintonizados para correção de fator de potência;
- e) Avaliar economicamente a melhor solução para correção do FP de instalações industriais com GD.

1.3 JUSTIFICATIVA

A busca dos consumidores por sistemas de geração distribuída tem como principal incentivo a redução da conta de energia elétrica proporcionalmente à potência de GD instalada. Neste sentido, muitas unidades consumidoras industriais no Grupo A, ao buscarem por serviços de instalação de energia solar fotovoltaica, podem se deparar com ao final do projeto com uma redução na fatura da concessionária menor do que a prevista inicialmente.

Isso pode acontecer, pois, ao se reduzir o montante de energia ativa proveniente da rede elétrica pela instalação do sistema fotovoltaico, porém permanecendo a carga consumindo energia reativa, o fator de potência na entrada da instalação pode atingir valores bem abaixo do mínimo permitido no

PRODIST, Módulo 8, (ANEEL, 2018) que é de $FP=0,92$. Assim, apesar da redução do valor em kWh, o montante de kvarh, pode exceder e ser cobrado na fatura.

Logo, trabalhar com soluções para tentar mitigar o baixo avaliando a atratividade técnica e financeira no longo prazo para esses clientes deverá atrair uma crescente parcela desse mercado, demandando estudo de novos modelos de negócios para geração distribuída enfocando esse segmento de clientes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na fundamentação teórica deste estudo é apresentada uma breve revisão de como funciona o faturamento de energias em unidades prosumidoras e a cobrança das concessionárias por baixo fator de potência e os métodos utilizados para se ajustar o fator de potência de uma instalação.

Em materiais e métodos são definidos quais casos serão analisados – diferentes combinações de demandas contratadas, potência das usinas fotovoltaicas e fator de potência pré-existente na instalação – os diagramas unifilares simplificados das instalações e os parâmetros da simulação computacional.

Na análise de resultados cada uma das três soluções foi comparada, caso a caso, em termos técnicos e financeiros. A partir dos valores obtidos nas tabelas e nas simulações desse capítulo chegou-se nas conclusões deste trabalho, presentes no último capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE DA REN 482/2012

Segundo a REN N°482/2012, a energia ativa injetada na rede da concessionária deverá ser abatida do faturamento mensal aplicado ao consumo ativo das unidades prosumidoras. Caso haja saldo remanescente, o saldo de energia injetada poderá ser utilizado para compensar o consumo ativo de outras UCs (ANEEL, 2016).

Ao final do período de faturamento, o valor a ser cobrado será igual à diferença positiva entre a energia consumida e a injetada, adicionados o crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, sobre os quais devem incidir todos os componentes da tarifa (ANEEL, 2010).

Quanto ao faturamento da demanda de energia ativa, do consumo reativo e da demanda reativa, a REN N°482/2012 e suas revisões estabelecem que devem ser seguidas as regras aplicadas aos demais consumidores do mesmo subgrupo.

2.2 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência pode ser definido como um indicador do grau de eficiência em que um determinado sistema elétrico está funcionando. Este índice é dado pelo quociente da energia elétrica ativa pela energia aparente, medidos em um mesmo intervalo de tempo [ANEEL 414/2010], onde esta última é o resultado da raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa.

Quando a energia reativa é de natureza indutiva, diz-se que o fator de potência é também indutivo, o mesmo ocorre quando a energia reativa tem caráter capacitivo. Este parâmetro pode assumir valores entre 0 e 1, quanto maior o valor do fator de potência, maior a eficiência do sistema empregado. Valores acima de 0,92 indutivo ou capacitivo indicam que a maior parte da energia recebida pela instalação está sendo usada efetivamente para realizar trabalho [ANEEL 414/2010].

Em unidades consumidoras pertencentes ao grupo A a medição do fator

de potência para cobrança deve ser, obrigatoriamente, feita pela distribuidora, através da verificação contínua dos níveis deste parâmetro [ANEEL 569/2013].

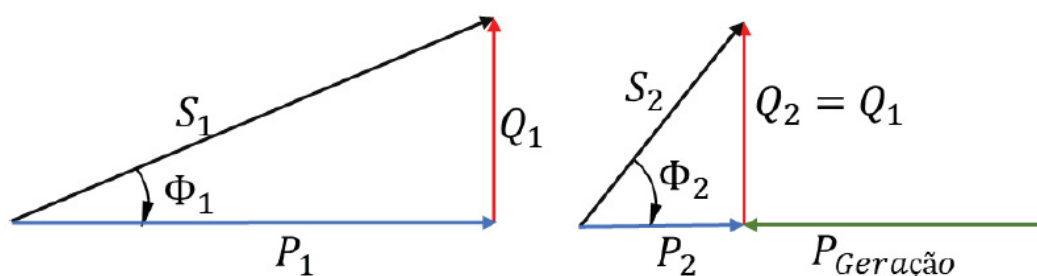
As medições devem ser tomadas a cada 15 minutos, onde o valor mínimo deve ser 0,92 indutivo ou capacitivo. Para unidades consumidoras pertencentes ao grupo B esta verificação é facultativa, não podendo este consumidor ser cobrado por excesso de energia reativa. (SILVA, VIEIRA, & GUERRA, 2018); (ANEEL, REN 414/2010).

2.3 DIMINUIÇÃO DO FP COM INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

As plantas de geração fotovoltaica visam suprir a potência ativa da unidade consumidora, atuando com fator de potência 1, entretanto, as cargas conectadas ao sistema, comumente, consomem potência reativa, que só é fornecida pela concessionária e diminui o fator de potência da rede.

Ao se inserir uma fonte geradora junto à carga, um fluxo menor de energia ativa precisa entrar pela concessionária, o que acaba gerando uma diminuição do fator de potência, visto que a energia reativa que entra continua sendo a mesma.

Figura 2: Mudança do FP da instalação após inserção de geração distribuída



FONTE: (ALBUQUERQUE & TRISTÃO, 2020)

2.3.1 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A compensação do fator de potência é uma importante forma de melhorar o desempenho da rede e minimizar os efeitos de algumas anomalias que podem acometê-la. Segundo (YANG, BLAABJERG, WANG, & SIMÕES, 2016) é possível limitar a quantidade de potência ativa fornecida pelos painéis

fotovoltaicos à rede elétrica, a fim de diminuir a ocorrência de sobretensões. É importante também fornecer potência reativa, buscando tornar o fator de potência da unidade consumidora igual a 1. Assim, para a rede elétrica a instalação consome apenas potência ativa, evitando perdas para o sistema de distribuição.

Durante o período noturno não há irradiação e, portanto, não há geração de energia ativa feita pelos painéis fotovoltaicos, dessa forma, quando o sistema de compensação de capacitores continua atuando, há uma injeção de energia reativa no sistema elétrico, que deve ser limitada para evitar sobretensões no sistema.

O consumidor pode optar por usar o sistema fotovoltaico gerando reativos durante o horário sem irradiação, o que é interessante para a distribuidora, como forma de regular a tensão da rede, entretanto, esta escolha implicará na redução da vida útil da planta (YANG, BLAABJERG, WANG, & SIMÕES, 2016).

2.4 GERAÇÃO DE HARMÔNICAS PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST – Módulo 8).

A forma de onda da corrente na saída dos inversores é a replicação da senoide fundamental (60Hz) através do chaveamento dos MOSFETs de potência. A frequência desse chaveamento é variável e é definida pelo circuito rastreador de máxima potência (MPPT). Nos momentos de menor incidência solar, como no nascer e no pôr do Sol, o MPPT trabalha em uma frequência de chaveamento menor para extrair mais potência dos módulos, resultando em harmônicas possivelmente mais danosas para a rede elétrica, como as de terceira, quinta e sétima ordem, conhecidos da literatura por terem amplitudes maiores. (ALMEIDA, GARCIA, & DUARTE, 2021)

Segundo Felipe de Carvalho, 2019, observamos que os inversores podem chegar à faixa de 40% de DHTi nesses períodos de baixa irradiância.

A presença de harmônicos pode ocasionar diversos problemas nas instalações, como sobreaquecimento dos condutores e máquinas, devido ao efeito pelicular; vibração em máquinas rotativas, diminuindo sua vida útil pelo desgaste mecânico; ressonância que pode amplificar distúrbios harmônicos em determinadas frequências; quedas de tensão nas fases; aumento das tensões entre neutro e terra; entre outros.

2.5 MÉTODOS PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

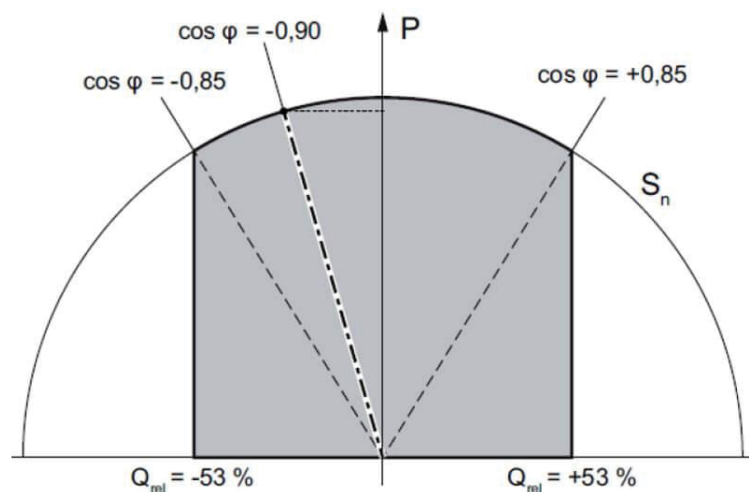
Os métodos aqui analisados serão o ajuste dos inversores e a instalação de bancos de capacitores convencionais e dessintonizados.

2.5.1 AJUSTE DO FP DO(S) INVERSOR(ES)

Em conformidade com a (IEEE 1547, 2018), os inversores disponíveis atualmente devem permitir o controle do usuário para ajustar seus parâmetros de operação conectados à rede, como o fator de potência, garantindo sua operação no valor definido, que pode variar de 1 a 0,8 indutivo ou capacitivo, de acordo com a necessidade. Esse fator de potência deve ser reestabelecido em até 10 segundos, caso haja alguma variação momentânea na rede.

Operar o inversor com fator de potência diferente do unitário pode ser a solução mais fácil se a capacidade dele for o suficiente, porém o retorno do investimento da instalação fica mais longo, uma vez que o cliente é cobrado, primariamente, pela energia ativa consumida da concessionária. No entanto, a injeção ou consumo de energia reativa por parte do inversor estão limitadas à capacidade dele, variando para cada modelo e potência, conforme exemplo da Figura 3.

Figura 3: Curva de Capabilidade do inversor fotovoltaico



2.5.2 BANCOS DE CAPACITORES PUROS

Os bancos de capacitores são a tecnologia mais amplamente utilizada há anos para correção do fator de potência, fornecendo energia reativa para a rede em que são instalados. Eles podem ser instalados em bancos menores juntos à(s) carga(s) que impacta(m) no fator de potência da instalação ou um banco central, junto ao quadro de distribuição geral.

São a solução mais simples de se implementar e, conseqüentemente, mais barata, porém podem causar ressonâncias harmônicas, que implicam em riscos como desligamentos, perda de equipamentos e até mesmo vidas (ALMEIDA, GARCIA, & DUARTE, 2021).

2.5.3 BANCOS DE CAPACITORES COM REATOR DE SINTONIA E DESSINTONIA

A correção do fator de potência por bancos de capacitores com indutores de dessintonia é realizada para evitar a ressonância do banco de capacitores com o sistema elétrico, reduzindo a amplificação dos níveis harmônicos, evitando a queima e aumentando a vida útil dos equipamentos. A frequência de sintonia deste equipamento é definida em uma ordem harmônica pouco significativa para o sistema em questão, geralmente a 3ª ou 2ª harmônica.

O projeto do banco de capacitores dessintonizado visa primeiramente a correção do fator de potência, entretanto como esse sistema é também um filtro, ele também reduz a distorção harmônica e geram menores correntes de *inrush* quando comparados aos bancos de capacitores comuns, além de evitar ressonâncias de ordens superiores. (ALMEIDA, GARCIA, & DUARTE, 2021)

2.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Boa parte das referências bibliográficas deste estudo foram encontradas através do portal de periódicos da Capes, procurando pelas palavras-chave “fotovoltaica”, “qualidade de energia”, “fator de potência”.

Outras fontes internacionais também podem ser encontradas fazendo pesquisas com palavras-chave em inglês, através das ferramentas *Publish or*

Perish e Mendeley Reference Manager.

Primeiramente serão definidos os eixos de pesquisa e as palavras-chave para realizar as buscas cruzadas dos artigos mais relevantes.

Eixos de pesquisa e palavras-chave:

- EP1: Aplicação
 - EP1_PC1: Industrial Plant
 - EP1_PC2: Photovoltaic
- EP2: Metodologia
 - EP2_PC1: Power factor
 - EP2_PC2: Photovoltaic
 - EP2_PC3: Power quality

Tendo definidas as palavras chaves de cada eixo de pesquisa, serão feitas buscas na ferramenta *publish or perish* com o cruzamento de cada linha com cada coluna da tabela a seguir. Para incluir ambas as palavras-chave na pesquisa, utiliza-se o conector “AND” entre as palavras chave.

	Power factor	Photovoltaic	Power quality
Industrial plant		Reactive power demand AND Industrial plant	
Photovoltaic	Power factor AND Photovoltaic		Power quality AND Photovoltaic

Os trabalhos mais significativos encontrados sobre o tema no âmbito nacional foram os de (SILVA, VIEIRA, & GUERRA, 2018) e (TAVEIRA, LEÃO, & NETO, 2020), que são baseados no estudo de (PINTO, ZILLES, & BET, 2012), porém não abordam o tema de harmônicas e filtros dessintonizados. A eles, soma-se o trabalho de (ALMEIDA, GARCIA, & DUARTE, 2021) para obter mais uma solução possível para se resolver o mesmo problema.

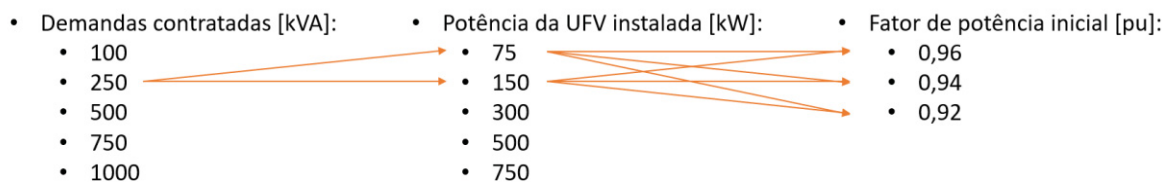
Somando-se às pesquisas acadêmicas, analisar-se-á nas empresas do

mercado atual os custos de projeto e implantação de três soluções, para encontrar um valor médio balizador para cada uma delas, considerando as faixas de potência julgadas mais relevantes. Assim, a análise financeira pode ser feita para os dias atuais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse estudo serão consideradas unidades consumidoras com demandas contratadas de 100, 250, 500, 750 e 1000 kVA; bem como fatores de potência de 0.96, 0.94 e 0.92, que representam alguns clientes que ainda não tinham cobranças por excedente de reativo previamente à instalação da geração distribuída.

No total, serão analisados 51 casos, resultantes dessas combinações possíveis. Como exemplo, 6 casos possíveis analisados para a demanda contratada de 250 kVA:

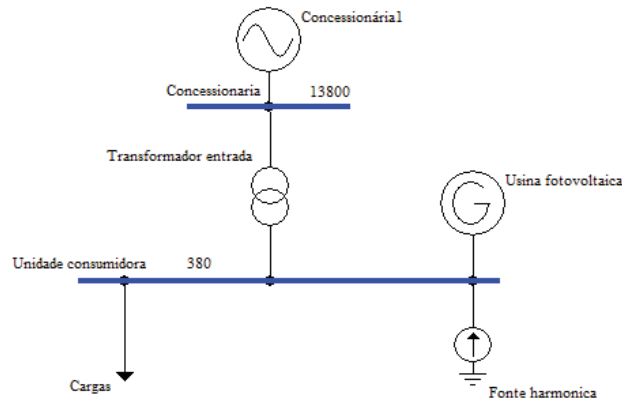


Para elucidar este estudo, será utilizado o software PQF 7.0. Este software tem por objetivo analisar a qualidade da energia elétrica (Power Quality) e resolver circuitos elétricos em regime permanente, visando proporcionar uma ferramenta computacional simples, dinâmica e de uso diário na operação do sistema elétrico englobando as necessidades básicas dos engenheiros e técnicos especializados, enfocando itens como:

- Cálculo do fator de potência e sua correção;
- Alocação de banco de capacitores em ambientes com sinais senoidais e aqueles contendo harmônicos;
- Cálculo das potências Ativa, Reativa e Aparente;

O diagrama esquemático da Figura 4 será utilizado como referência para todas as unidades consumidoras:

Figura 4: Diagrama Esquemático das unidades consumidoras



FONTE: Autor (2022)

O inversor é representado por uma fonte geradora, mais uma fonte de corrente harmônica com diferentes níveis de amplitude para cada ordem harmônica. Estes níveis apresentados na Tabela 1 são de referência para um gerador de 125 kW, para outras potências serão utilizados valores proporcionais.

A simulação computacional foi feita adotando-se o seguinte sistema:

- Fonte de tensão com potência de curto-circuito de 75 MVA em 13,8 kV
- Transformador 13,8/0,38 kV, 1250 kVA e impedância de 8%
- Carga trifásica de 1000 kVA com FP=0,92 e distorção harmônica de corrente total de DHTI(%)=3,3%.
- Sistema de geração fotovoltaico de 750 kWp com a injeção de correntes harmônicas descrita na Tabela 1:

Tabela 1: ordens harmônicas injetadas pelo sistema fotovoltaico

Ordem harmônica	Magnitude em (A)
2	2,94
3	1,98
5	7,44
7	7,2
11	3,96
13	2,28
17	3,9
19	2,82

FONTE: Autor (2022)

- Equipamento de compensação reativa em baixa tensão de 300 kvar, necessário a manter o FP em 0,96 foram usados os seguintes equipamentos
 - Banco de capacitor
 - Filtro harmônico dessintonizado ($F_s = 168$ Hz);
 - Filtro harmônico sintonizado em 5ª harmônica ($F_s = 288$ Hz)

As frequências F_s foram definidas ligeiramente abaixo da frequência múltipla da fundamental prevendo um futuro aumento da capacitância devido ao desgaste do banco de capacitores, que acarreta num aumento da frequência de sintonia.

Para calcular o banco de capacitores ideal para correção do fator de potência, consideramos constante a potência ativa consumida pela unidade, então encontramos um novo valor para a potência aparente S' que se deseja atingir após a instalação do banco, por meio da equação:

$$S' = \frac{P'}{fp_r}$$

Onde P' é a potência ativa resultante consumida da concessionária, considerando a usina fotovoltaica no pico de sua geração e f_{pr} é o valor do fator de potência de referência, que se busca: no caso, 0,92.

Com o novo valor da potência aparente, é possível determinar qual será a nova potência reativa Q' a ser consumida através de:

$$Q' = \sqrt{S'^2 - P'^2}$$

Assim, podemos achar a potência do banco de capacitores a ser instalado calculando a diferença da potência reativa original Q de Q'

$$Q_{BC} = Q - Q'$$

Para se determinar os custos adicionais com o excedente de reativo, calcula-se o limite de reativo a ser consumido da rede para aquela demanda, considerando o fator de potência referência de 0.92. Logo, tudo que passar daquilo é cobrado com o seu devido valor. Neste caso, pelo valor da tarifa. Adotaremos o valor de R\$ 0,445/kVArh consumido, tanto na ponta, quanto no fora ponta, de acordo com uma fatura de energia de 2022 cedida por uma unidade consumidora que preferiu não ser identificada.

Figura 5: fatura de energia da Copel com tarifação por excedente de reativos

Valores Faturados						
NOTA FISCAL/CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA N° 235.405.287 - SÉRIE B						
Emitida em 28/01/2022						
Produto Descrição	Un.	Grandezas Faturadas	Valor Unitário	Valor Total	Base de Cálculo	Aliq. ICMS
ENERGIA ELETRICA TE PONTA	kWh	392,00	0,674719	264,49	264,49	29,00
ENERGIA ELETRICA USD PONTA	kWh	392,00	1,478087	579,41	579,41	29,00
ENERGIA ELETRICA TE F PONTA	kWh	1428,00	0,424314	605,92	605,92	29,00
ENERGIA ELETRICA USD F PONTA	kWh	1428,00	0,127269	181,74	181,74	29,00
ENERGIA TRIBUT DIF PT TE	kWh	11,00	0,437273	4,81	0,00	0,00
ENERGIA TRIBUT DIF PT TUSD	kWh	11,00	1,350909	14,86	14,86	29,00
ENERGIA TRIBUT DIF FP TE	kWh	2414,00	0,275356	664,71	0,00	0,00
ENERGIA TRIBUT DIF FP TUSD	kWh	2414,00	0,116334	280,83	280,83	29,00
ENERGIA REAT EXCED TE PONTA	kWh	16,00	0,445000	7,12	7,12	29,00
ENERGIA REAT EXCED TE F PONTA	kWh	1885,00	0,445178	839,16	839,16	29,00
DEMANDA USD	kW	56,28	26,304016	1.480,39	1.480,39	29,00
DEMANDA USD ISENTA ICMS	kW	8,72	18,677752	162,87	0,00	0,00
ENERGIA CON B ESCASSEZ HID	kWh			398,21	398,21	29,00
ENERGIA EQUIV. INJ. BAND. ESC.H	kWh			344,34	0,00	0,00

FONTE: Autor (2022)

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados os resultados de cada hipótese, caso a caso

4.1 AJUSTE DO FATOR DE POTÊNCIA DOS INVERSORES

O objetivo deste ajuste é definir o fator de potência médio mensal para 0,92, portanto essa abordagem não isenta o consumidor totalmente das tarifas, pois a medição pontual ainda pode detectar excedentes, visto que a geração fotovoltaica depende das condições climáticas, porém pode fazer ajustes que ainda justifiquem financeiramente. (TAVEIRA, LEÃO, & NETO, 2020). O ajuste do fp dos inversores não é um recurso que substitui a instalação de um banco de capacitores, eles apenas têm a capacidade de fornecer uma pequena correção, quando necessário. A sua maior utilidade é contribuir com o controle dos níveis de tensão em redes elétricas “fracas”, ou seja, fim de linhas em áreas rurais, pontos com baixo nível de curto-circuito ou microrredes.

Antes de considerar a instalação da geração distribuída, cada unidade consumidora será expressa em termos de suas energias ativa e reativa, considerando que elas estão consumindo da concessionária 100% da sua demanda contratada como potência aparente S [kVA], durante 8h diárias.

Tabela 2: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré existente de 0,96

	FP inicial: 0,96				
Demanda	100	250	500	750	1000
Ea [kWh]	23.040	57.600	115.200	172.800	230.400
Er [KVArh]	6.720	16.800	33.600	50.400	67.200

FONTE: Autor (2022)

Tabela 3: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré-existente de 0,94

		FP inicial: 0,94			
Demanda	100	250	500	750	1000
Ea [kWh]	22.560	56.400	112.800	169.200	225.600
Er [KVArh]	8.188	20.470	40.941	61.411	81.882

FONTE: Autor (2022)

Tabela 4: Consumo energético mensal das unidades consumidoras considerando fator de potência pré-existente de 0,92

		FP inicial: 0,92			
Demanda	100	250	500	750	1000
Ea [kWh]	22.080	55.200	110.400	165.600	220.800
Er [KVArh]	9.406	23.515	47.030	70.545	94.060

FONTE: Autor (2022)

Adotando-se uma geração de 100kWh/kW.mês, essas usinas terão a geração de energia ativa representada na Tabela 4, considerando que irão operar em fator de potência unitário, cenário padrão no mercado atual.

O custo das usinas foi estipulado com base no último estudo da Greener (2021), do primeiro semestre de 2021. Não estava presente o valor exato para a usina de 750 kW, portanto foi feita a média entre os valores de 500 kW e 1 MW.

Tabela 5: Valores de referência de usinas fotovoltaicas

Potência da usina [kW]	Custo da usina [R\$]	Geração mensal estimada [kWh]	Economia mensal estimada [R\$]
75	R\$ 273.000,00	7.500	R\$ 3.182,36
150	R\$ 546.000,00	15.000	R\$ 6.364,71
300	R\$ 1.077.000,00	30.000	R\$ 12.729,42
500	R\$ 1.865.000,00	50.000	R\$ 21.215,70
750	R\$ 2.763.750,00	75.000	R\$ 31.823,55

FONTE: Autor (2022)

Essas unidades, agora consumindo menos energia ativa e mantendo seu consumo normal de energia reativa - que já existia - tiveram a alteração no seu fator de potência conforme as Tabelas 5, 6 e 7. Destacam-se em vermelho aquelas que serão afetadas por cobranças adicionais por excedente de reativo. As figuras 5, 6 e 7 representam graficamente o fp resultante de cada unidade consumidora após instalar a geração fotovoltaica. No eixo horizontal estão separadas as unidades nos 5 patamares de demanda contratada em kW e, em cada patamar, as barras coloridas representando as instalações fotovoltaicas possíveis para aquela demanda contratada, também em kW.

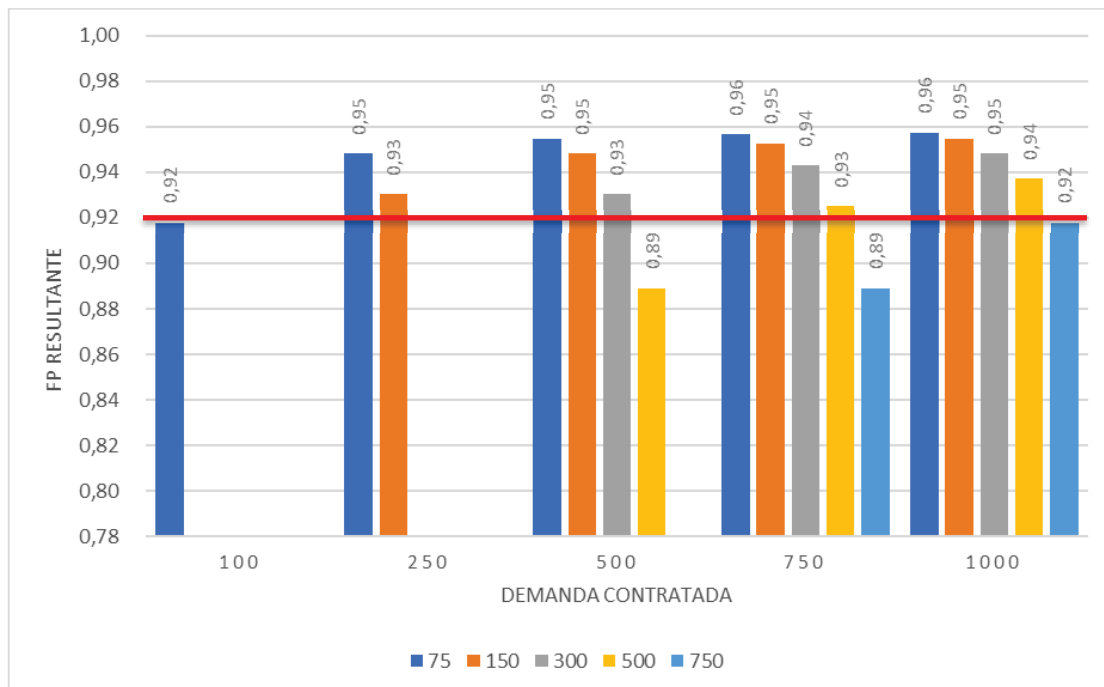
Para as unidades consumidoras estudadas cujo fp inicial era de 0,96, nota-se que quatro casos já tiveram diminuição significativa a ponto de saírem da faixa aceitável. Esses casos estão destacados em vermelho na Tabela 6.

Tabela 6: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96

		FP inicial: 0,96				
		FP do inversor: 1				
Demanda		100	250	500	750	1000
Potência da GD instalada	75	0,92	0,95	0,95	0,96	0,96
	150	-	0,93	0,95	0,95	0,95
	300	-	-	0,93	0,94	0,95
	500	-	-	0,89	0,93	0,94
	750	-	-	-	0,89	0,92

FONTE: Autor (2022)

Figura 6: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96



FONTE: Autor (2022)

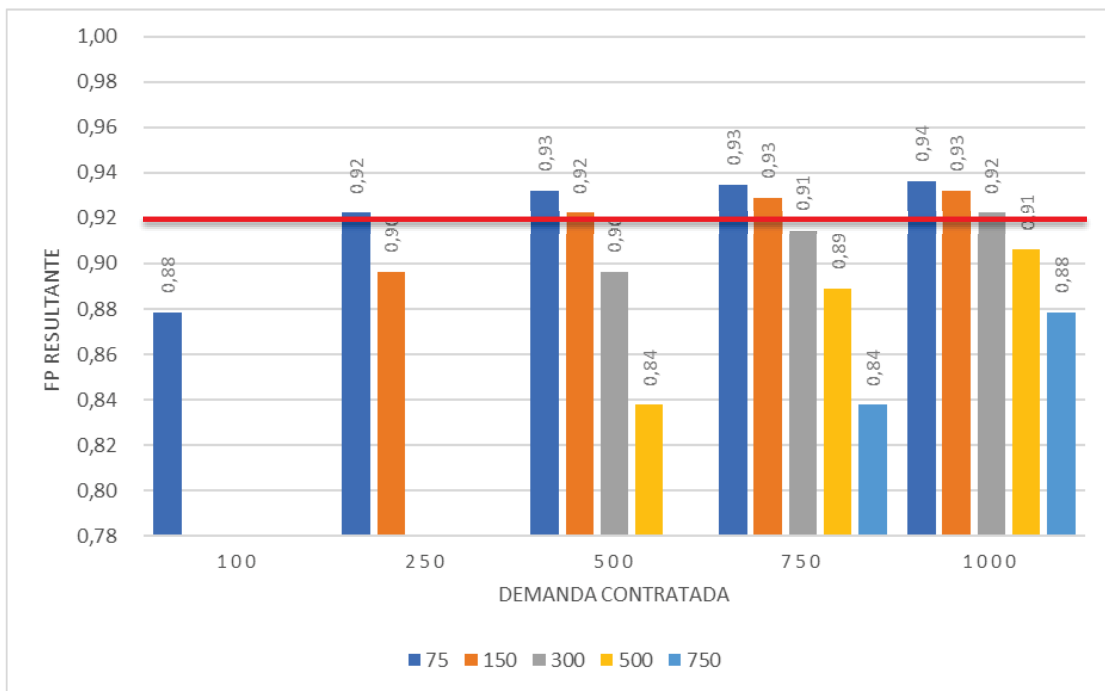
Já para os casos em que as unidades consumidoras tinham seu fator de potência inicialmente em 0,94, o número de casos subiu para 9, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94

		FP inicial:		0,94		
		FP do investidor:		1		
Demanda		100	250	500	750	1000
Potência da GD instalada	75	0,88	0,92	0,93	0,93	0,94
	150	-	0,90	0,92	0,93	0,93
	300	-	-	0,90	0,91	0,92
	500	-	-	0,84	0,89	0,91
	750	-	-	-	0,84	0,88

FONTE: Autor (2022)

Figura 7: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94



FONTE: Autor (2022)

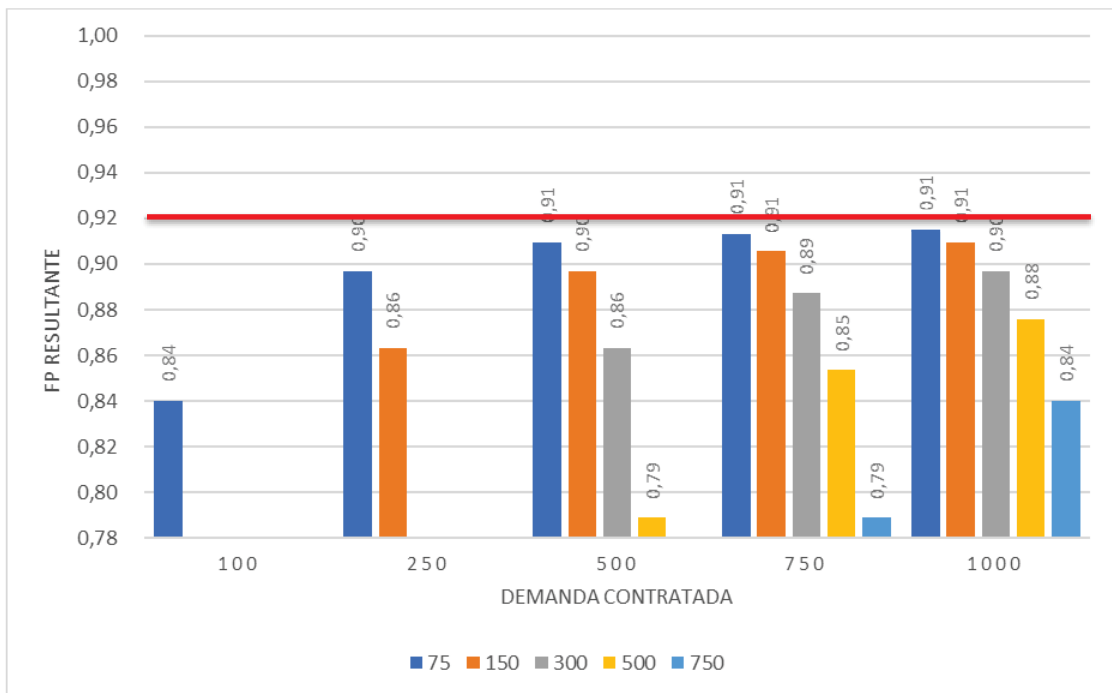
Por fim, para os casos em que o fator de potência inicial já era de 0,92, ou seja, no limite da cobrança de taxas (caso comum quando já se tem um banco de capacitores instalado na unidade), todos eles terão que arcar com custos extras por excedente de reativo a partir do momento da instalação da GD.

Tabela 8: fp resultante para UCs com fp inicial 0,92

		FP inicial: 0,92				
		FP do inversor: 1				
Demanda		100	250	500	750	1000
Potência da GD instalada	75	0,84	0,90	0,91	0,91	0,91
	150	-	0,86	0,90	0,91	0,91
	300	-	-	0,86	0,89	0,90
	500	-	-	0,79	0,85	0,88
	750	-	-	-	0,79	0,84

FONTE: Autor (2022)

Figura 8: fp resultante para UCs com fp inicial 0,92

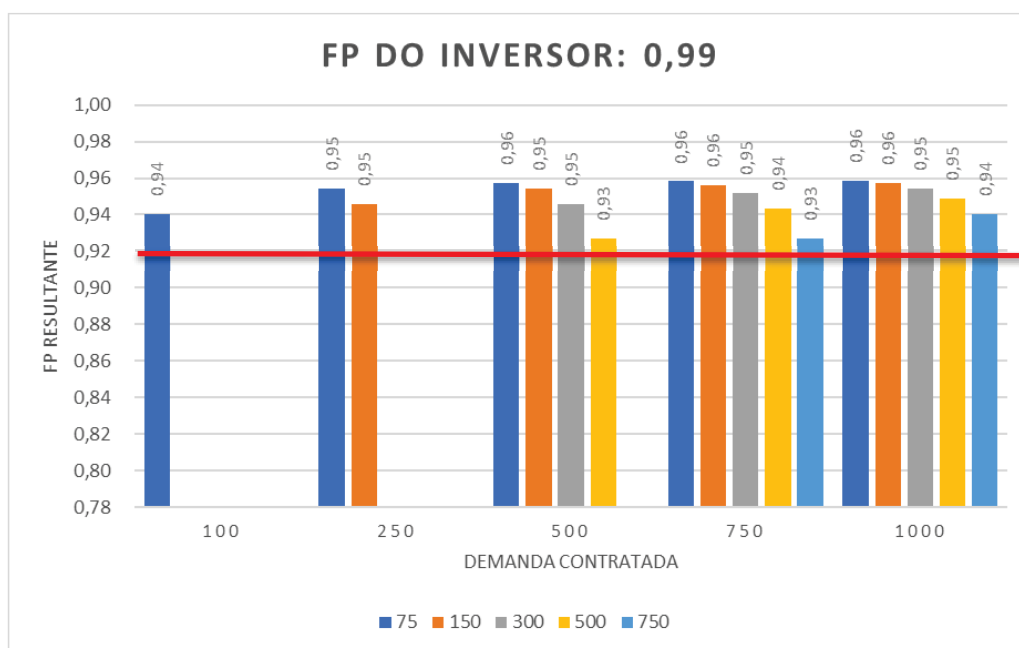


FONTE: Autor (2022)

Para calcular o tempo de retorno do investimento nesse caso, simplesmente divide-se o tempo de retorno do investimento original pelo fator de potência necessário do inversor, visto que é diretamente proporcional à energia ativa gerada pelo sistema. Os casos em que ficaram com FP abaixo de 0,92 serão descritos no formato “demanda contratada x potência de GD instalada”

- FP inicial da instalação: 0,96
 - Todos os quatro casos têm o fator de potência global (baseado no consumo lido pelo medidor no final de cada ciclo de cobrança) de volta a 0,92 ajustando o fp do inversor para 0,99 capacitivo. O retorno do investimento se atrasa em somente um mês, em relação ao custo inicial da usina.

Figura 9: fp resultante para UCs com fp inicial 0,96 após ajustar fp do inversor para 0,99

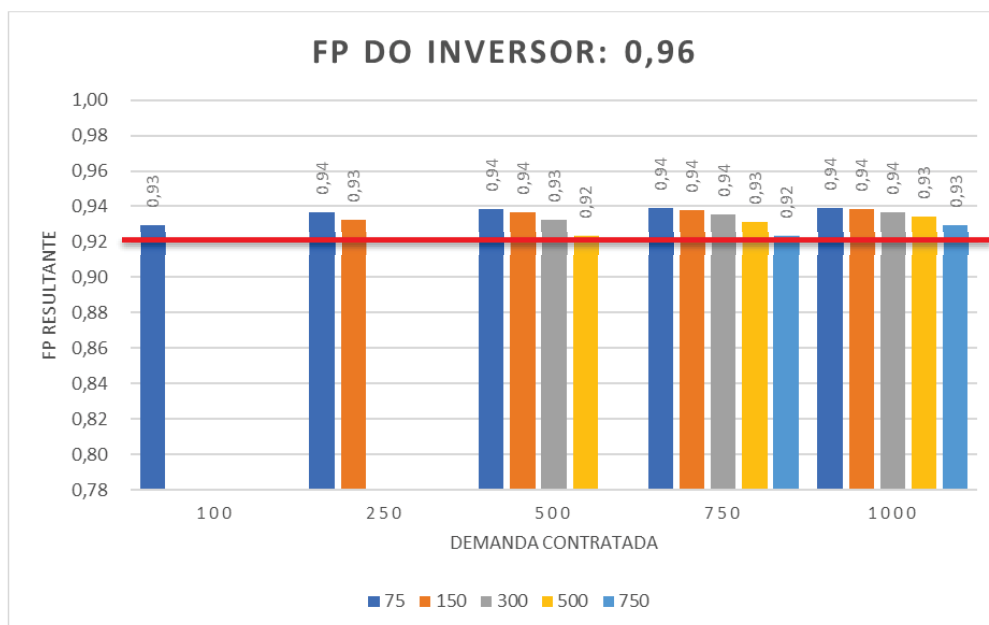


FONTE: Autor (2022)

- FP inicial da instalação: 0,94
 - O fp global do caso 750x300 kW volta para 0,92 ajustando o fp do inversor para 0,99, aumentando o tempo de retorno em 1 mês;
 - O fp global dos casos 500x300 kW e 250x150kW atinge 0,92 ajustando o fp do inversor para 0,98, aumentando o tempo de retorno em 2 meses cada;
 - O fp global dos casos 100x72 kW, 750x500 kW e 1000x750 kW atinge 0,92 ajustando o fp do inversor para 0,97, aumentando o tempo de retorno em 3 meses cada;

- O fp global dos demais casos (500x500 kW e 750x750 kW) atingem 0,92 ajustando o fp do inversor para 0,96, aumentando o tempo de retorno em 4 meses cada.

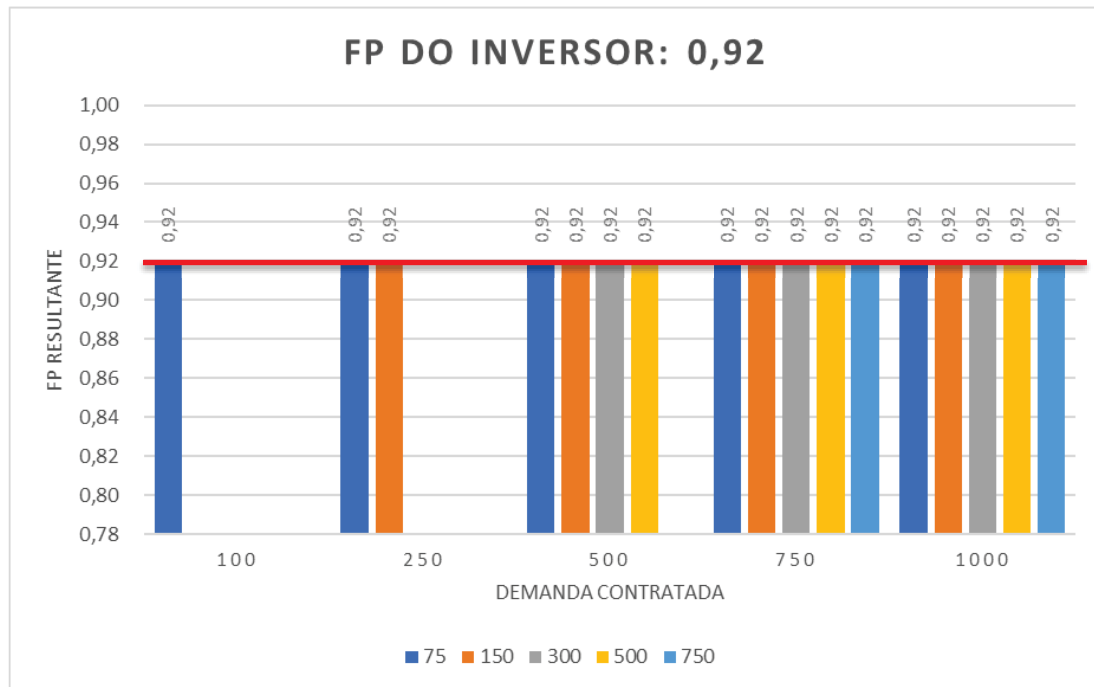
Figura 10: fp resultante para UCs com fp inicial 0,94 após ajustar fp do inversor para 0,96



FONTE: Autor (2022)

- FP inicial da instalação: 0,92
 - Todos os casos somente retornam a 0,92 após ajustar o fp do inversor também para 0,92, aumentando o tempo de retorno do investimento em 8 meses cada.

Figura 11: fp resultante para UCs com fp inicial de 0,92 após ajustar fp do inversor para 0,92



FONTE: Autor (2022)

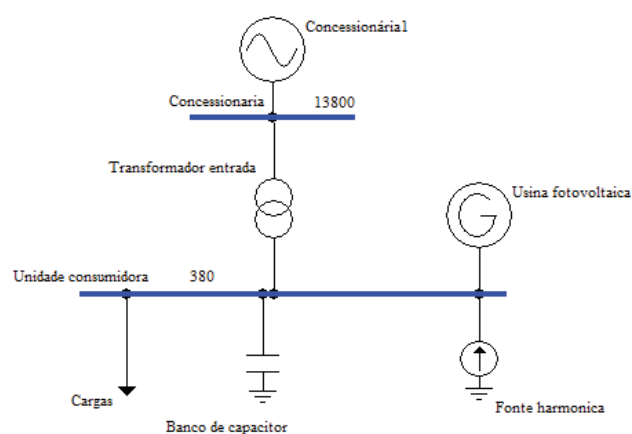
4.2 BANCO DE CAPACITORES PURO

Muito embora se reconheça que a definição e especificação do equipamento de compensação reativa, como definição de estágios, característica dos componentes, dentre outros aspectos, este trabalho não se atentará a estas questões, considerando o pior cenário, que é o caso da usina operando em sua capacidade máxima, ou seja, o banco de capacitor fornecendo a máxima potência reativa. O banco deverá ser dividido em estágios para que se ajuste à potência ativa consumida em cada momento do dia, visto que a geração da usina é variável.

Para determinar o custo do banco, será adotado como referência de investimento o valor de R\$ 250/KVAr, já incluso todos os equipamentos necessários e o custo de instalação. Este valor foi fornecido pela fabricante de equipamentos de compensação reativa, Bree Eficiência Energética. O diagrama equivalente do sistema com banco de capacitores puro é apresentado na Figura 11.

Para calcular o tempo de retorno do investimento de um banco de capacitores será necessário determinar quanto seria a multa mensal por excedente de reativos. Para isso, adotar-se-á um fator de 50% em cima do tempo de funcionamento da indústria, que representa o tempo em que a potência da usina fotovoltaica é significativa a ponto de onerar o consumidor por baixo fator de potência. Esse valor foi definido em detrimento da baixa potência no início e no fim do dia.

Figura 12: diagrama do sistema com banco de capacitores puro



FONTE: Autor (2022)

Em todos os casos simulados, independente do fator de potência inicial das unidades consumidoras, o banco de capacitores tem seu payback completo no quinto mês, considerando o valor da multa como sendo o resultado mensal do fluxo de caixa.

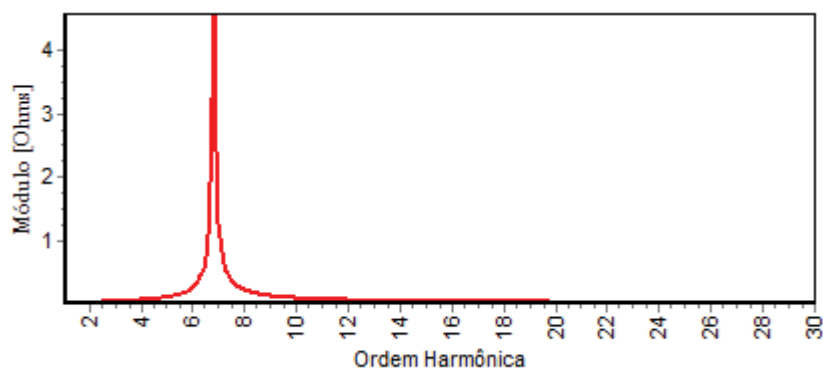
Os resultados das simulações computacionais podem ser vistos na Tabela 9:

Tabela 9: resultados da qualidade de energia após instalação de banco de capacitor puro

	Sem GD e compensação	Com GD Sem compensação	Com Banco de capacitor
Tensão no secundário do Trafo (V)	368	370	381
DHTV(%) em 380 V	1,58	1,38	11,82
DHTI(%) corrente do trafo	3,34	7,67	112,1
FP no ponto de conexão com a concessionária (pu)	0,92	0,48	0,65
Potência reativa fornecida pela concessionária (kvar)	341	340	40,8

Nota-se que a compensação somente com banco de capacitor, devido às harmônicas da carga e da GD (3.3% de DHT já presentes na carga somadas às harmônicas geradas pelo inversor), levou o sistema à uma ressonância na sétima harmônica, conforme pode ser visto pela Figura 12, que mostra a impedância da barra de 380 V pela frequência. A distorção total de 11,82% está acima do limite do Prodist para barramentos de baixa tensão. Nota-se também que, devido à ressonância, o fator de potência da instalação não foi corrigido totalmente.

Figura 13: Impedância $Z(\omega)$ da barra da Unidade Consumidora



Neste caso, o uso deste tipo de equipamento de compensação reativa, ou seja, banco de capacitor puro, é não recomendado, muito embora tenha um baixo custo quando comparado às demais soluções.

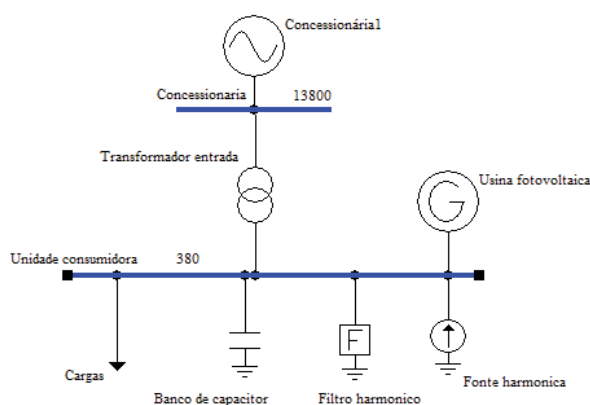
4.3 BANCO DE CAPACITORES COM FILTROS

Os bancos de capacitores com filtros são aplicados para correção do fator de potência onde há presença de cargas não-lineares. De modo geral, contam com a presença de um indutor em série com o banco de capacitores, para formar um filtro do tipo LC. A frequência de ressonância desse filtro atenua a presença das harmônicas do sistema, podendo direcionar elas à terra ou a refleti-las, dependendo do projeto.

Assim como no caso do banco de capacitores puro, não serão apresentados cálculos de dimensionamento do banco e dos filtros, apenas o ideal para cada caso. Para precificar os bancos de capacitores com filtro de dessintonia será utilizado como referência o valor de R\$ 300/KVAr, já inclusos todos os equipamentos necessários e o custo de instalação. Analogamente, para os filtros sintonizados será adotado o valor de R\$ 550/KVAr.

O diagrama equivalente do sistema com o banco de capacitores e o filtro de dessintonia é apresentado na Figura 13.

Figura 14: diagrama do sistema com banco de capacitores e filtro dessintonizado



FONTE: Autor (2022)

Tabela 10: resultados da qualidade de energia após instalação de banco de capacitor com filtros

	Sem GD e compensação	Com GD Sem compensação	Com filtro dessintonizado	Com Filtro Sintonizado
Tensão no secundário do Trafo (V)	368	370	378	378
DHTV(%) em 380 V	1,58	1,38	1,12	0,71
DHTI(%) corrente do trafo	3,34	7,67	12,08	10,35
FP no ponto de conexão com a concessionária (pu)	0,92	0,48	0,97	0,97
Potência reativa fornecida pela concessionária (kvar)	341	340	45,28	45,25

FONTE: Autor (2022)

Nota-se uma diferença significativa nas distorções totais de tensão DHTV do barramento de 380 V e na distorção total de corrente DHTI do transformador de entrada. Em ambos os casos, o fator de potência foi ajustado para a faixa aceitável regulamentada pelo Prodist.

O cálculo do payback é idêntico ao caso do banco de capacitores puro, porém considerando as diferenças de custo em R\$/KVAR, o retorno do investimento se dá no 6º mês para todos os casos considerando a instalação de um filtro dessintonizado e no 11º mês para instalação de um banco com filtro sintonizado.

5 CONCLUSÕES

O ajuste do fp próprio dos inversores não é uma maneira garantida de solucionar a tarifação extra por excedente de reativos, porém pode ser uma alternativa para diminuí-la, especialmente se o fator de potência inicial for de até 0,96 indutivo, onde o payback da instalação da usina não é afetado significativamente. Essa solução tem maior efeito nos casos analisados, visto que as potências das usinas analisadas são significativas perante à demanda contratada das unidades consumidoras.

Caso o fator de potência inicial era menor que 0,96, a solução mais atrativa financeiramente é o banco de capacitores puro. No entanto, apesar de não depender de variações climáticas, também pode ser uma alternativa que não garanta a eliminação da taxa sobre o excedente de reativos, pois pode apresentar ressonâncias harmônicas e, além de não resolver o problema do fator de potência, pode causar danos a equipamentos e pessoas em contato com os equipamentos.

Assim, a melhor solução técnica para todos os casos em que se vale a instalação de um banco de capacitores é a instalação conjunta de um filtro para evitar a amplificação de harmônicas oriundas do(s) inversor(es). Tanto o filtro sintonizado como o dessintonizado corrigem o problema do fator de potência sem causar problemas de ressonância, porém o filtro dessintonizado se apresenta mais viável financeiramente, com menos da metade do tempo de retorno em relação ao sintonizado. O estudo de harmônicas para definir a ordem do filtro também tem um custo adicional que pode variar de acordo com a instalação elétrica da unidade. Esses custos, juntamente com o custo dos equipamentos em risco, devem ser considerados no investimento inicial para se obter o tempo de retorno exato.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, B. F., & TRISTÃO, L. G. (2020). AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE INVERSOR FOTOVOLTAICO PARA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.
- ALMEIDA, P. R., GARCIA, F. R., & DUARTE, M. T. (2021). Correção do Fator de Potência em Sistema Industrial com Minigeração Fotovoltaica: Estudo de Caso.
- ANEEL. (2010). Resolução Normativa 414.
- ANEEL. (2012). Resolução normativa 482.
- ANEEL. (2013). Resolução normativa 569.
- ANEEL. (2021). PRODIST Módulo 8.
- Greener. (2021). Estudo estratégico geração distribuída.
- IEEE. (2018). IEEE 1547. *Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.*
- PINTO, A., ZILLES, R., & BET, I. (2012). EXCEDENTE DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE. *Revista Brasileira de Energia Solar, III(2)*, 110-116.
- SILVA, A. K., VIEIRA, R. G., & GUERRA, M. d. (2018). ESTUDO DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE.
- TAVEIRA, I. M., LEÃO, R. P., & NETO, T. N. (2020). A influência da geração fotovoltaica no fator de potência de unidades prossumidoras: uma avaliação técnica e financeira.
- YANG, Y., BLAABJERG, F., WANG, H., & SIMÕES, M. (2016). Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters.