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

WANDERLEY ARAÚJO DE CASTRO JÚNIOR

AVALIAÇÃO DE ASPECTOS DA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM UNIDADES SUJEITAS A COBRANÇA DE REATIVOS NO BRASIL

Ilha Solteira
2020

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

WANDERLEY ARAÚJO DE CASTRO JÚNIOR

AVALIAÇÃO DE ASPECTOS DA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM UNIDADES SUJEITAS A COBRANÇA DE REATIVOS NO BRASIL

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Júlio Borges de Souza
Orientador

Ilha Solteira
2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação de aspectos da instalação de geração distribuída fotovoltaica em unidades sujeitas a cobrança de reativos no Brasil

AUTOR: WANDERLEY ARAÚJO DE CASTRO JÚNIOR
ORIENTADOR: JULIO BORGES DE SOUZA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JULIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Dr. RODRIGO ALESSANDRO NUNES DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GIULIANO PIERRE ESTEVAM
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Tecnologia de Araçatuba - FATEC

Ilha Solteira, 07 de janeiro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C355a

Castro Júnior, Wanderley Araújo de.
Avaliação de aspectos da instalação de geração distribuída fotovoltaica em unidades sujeitas a cobrança de reativos no Brasil / Wanderley Araújo de Castro Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
100 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Júlio Borges de Souza
Inclui bibliografia

1. Fator de potência. 2. Geração distribuída. 3. Potência ativa. 4. Potência reativa. 5. Qualidade da energia. 6. Sistemas fotovoltaicos.

João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por possibilitar essa conquista.

Aos meus pais, Wanderley Araújo de Castro e Maria de Lourdes de Araújo Elviro, pelo incentivo.

À minha avó, Genesia Batista de Araújo, por acreditar que era possível.

Ao professor Dr. Júlio Borges de Souza, por seus ensinamentos, amizade e prontidão.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP.

À Universidade Federal do Acre – UFAC.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da UFAC, em particular aos Professores Dr. José Humberto Araújo Monteiro e José Elieser de Oliveira Júnior pelo incentivo.

Ao Professor Dr. José Ronaldo Melo, diretor do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da UFAC, pela confiança depositada.

Ao Professor Msc. Mario Jorge Bezerra da Costa, porque toda grande caminhada começa com os primeiros passos.

À minha filha Juliane Caroline Costa de Castro, pelo carinho nos momentos difíceis.

Em especial à minha esposa Luciane Costa Ricardo pelo apoio e dedicação incondicional.

"*Assim como a terra faz brotar a planta e o jardim faz germinar a semente, assim o Senhor Deus fará germinar a justiça e a sua glória diante de todas as nações.*"

Isaías 61, 11.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação dos aspectos da instalação de sistemas de geração distribuída fotovoltaica (GDFV) em unidades consumidoras sujeitas à cobrança de reativos no Brasil. A avaliação dos possíveis impactos técnicos e financeiro é realizada sob o alicerce da legislação e normativas aplicáveis. São abordados os modos de medição, sistema tarifário aplicado à unidade em estudo, bem como um comparativo com outros tipos de unidades consumidoras com geração distribuída (GD). São realizadas projeções de funcionamento em condições definidas, faz-se uso do equacionamento definido pela legislação e normas vigentes. Também é realizado um estudo de caso em uma unidade consumidora real. Como resultado apresentam-se gráficos que ilustram o comportamento da curva de geração fotovoltaica, consumo demandado, consumo medido, bem como o comportamento do fator de potência em unidades com GDFV instalada. Isto viabiliza a aferição de eventuais pontos positivos e negativos da instalação de GD nesse tipo de unidade consumidora. No estudo de caso também são apresentadas, em forma de tabela, os valores e percentuais de economia da unidade, comparando com o período sem GDFV. Por fim, são avaliados os possíveis impactos no tempo de retorno do investimento, contribuições negativas na qualidade de energia do sistema elétrico e apresentadas propostas de soluções para sanar ou atenuar os problemas encontrados.

Palavras-chaves: Fator de potência. Geração distribuída. Potência ativa. Potência reativa. Qualidade da energia. Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of the aspects of the installation of photovoltaic distributed generation systems in consumer units subjected to reactive charging in Brazil. The assessment of possible technical and financial impacts is carried out on the basis of applicable legislation and regulations. Measurement modes are addressed, the tariff system applied to the unit studied, a comparison is made with other types of consumer units with distributed generation (DG). Operating projections are carried out under defined conditions, using the equation defined by current legislation and standards. A case study is also performed in a real consumer unit. As a result we present graphs that illustrate the behavior of the photovoltaic generation curve, demanded consumption, measured consumption, as well as the behavior of the power factor in units with installed photovoltaic distributed generation system. This makes it possible to measure any positive and negative points of the installation of DG in this type of consumer unit. In the case study are also presented in table form the values and percentages of economy of the unit, comparing with the period without distributed photovoltaic generation. Finally, the possible impacts on return on investment time, negative contributions on the electric power quality of the electric system are evaluated and proposals of solutions to solve or mitigate the problems are presented.

Keywords: Power factor. Distributed generation. Active power. Reactive Power. Power Quality. Photovoltaic systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil. 15
Figura 2 – Variação do consumo setorial de eletricidade no Brasil. 16
Figura 3 – Capacidade instalada de energia solar fotovoltaica. 17
Figura 4 – Sistema fotovoltaico isolado. 20
Figura 5 – GD impossibilitado de conectar-se à rede 21
Figura 6 – GDFV sem armazenamento. 22
Figura 7 – GDFV com armazenamento. 23
Figura 8 – Modulo fotovoltaico 24
Figura 9 – Efeito da variação da irradiância solar sobre a curva característica I-V. 24
Figura 10 – Efeito da temperatura das células sobre a curva característica I-V 25
Figura 11 – Classificação de inversores de GDFV. 27
Figura 12 – Sistemas de medição: (a) um bidirecional e (b) dois medidores unidirecionais. . 28
Figura 13 – Sistema de medição em quatro quadrantes. 28
Figura 14 – Limite operacional de fator de potência para GDFV entre 3kW e 6kW 29
Figura 15 – Limites operacionais de fator de potência para GDFV acima de 6kW 30
Figura 16 – Fator de potência de instalações com GDFV e demanda de reativos 31
Figura 17 – Fator de potência visto pela medição. 31
Figura 18 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo B (dias úteis) 37
Figura 19 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo B (sábados, domingos e feriados) ... 37
Figura 20 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo A (dias úteis) 38
Figura 21 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo A (sábados, domingos e feriados) ... 38
Figura 22 – Forma de faturamento por violação dos níveis de fator de potência. 41
Figura 23 – Comparativo entre unidades 45
Figura 24 – Perfil típico de geração fotovoltaica. 46
Figura 25 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 1. 47
Figura 26 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 2. 48
Figura 27 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 3. 49
Figura 28 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais). 50
Figura 29 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais). 50
Figura 30 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência reativa (dias normais). 51
Figura 31 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (dias normais). 51
Figura 32 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados). 52
Figura 33 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados). 53
Figura 34 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1– Potência reativa (finais de semana e feriados). 53
Figura 35 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Fator de potência (finais de semana e feriados). 54
Figura 36 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais). 54
Figura 37 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais). 55

Figura 38 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (dias normais). 55
Figura 39 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Fator de potência (dias normais). 56
Figura 40 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados). 57
Figura 41 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados). 57
Figura 42 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (finais de semana e feriados). 58
Figura 43 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Fator de potência (finais de semana e feriados). 58
Figura 44 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Geração FV e Potência demandada pela carga. 59
Figura 45 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Potência ativa medida e demanda reativa. 60
Figura 46 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 – Potência reativa. 60
Figura 47 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Fator de potência. 61
Figura 48 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais). 62
Figura 49 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais). 62
Figura 50 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Potência reativa (dias normais). 63
Figura 51 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (dias normais) com correção de FP. 63
Figura 52 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados). 64
Figura 53 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados). 65
Figura 54 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência reativa (finais de semana e feriados). 65
Figura 55 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (finais de semana e feriados). 66
Figura 56 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais). 67
Figura 57 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 (dias normais) – Potência ativa medida e demanda reativa. 67
Figura 58 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (dias normais). 68
Figura 59 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Fator de potência (dias normais). 68
Figura 60 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados). 69
Figura 61 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados). 70
Figura 62 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (finais de semana e feriados). 70

Figura 63 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Fator de potência (finais de semana e feriados). 71
Figura 64 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Geração FV e Potência demandada pela carga. 72
Figura 65 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Potência ativa medida e demanda reativa. 72
Figura 66 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Potência reativa. 73
Figura 67 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Fator de potência. 73
Figura 68 – Performance linear de funcionamento. 76
Figura 69 – Perfil de operação típico da unidade consumidora sem GDFV (dias úteis). 78
Figura 70 – Perfil de fator de potência da unidade consumidora sem GDFV (dias úteis). 79
Figura 71 – Perfil típico de operação da unidade consumidora sem GDFV (final de semana). 80
Figura 72 – Perfil de fator de potência da unidade consumidora sem GDFV (fim de semana). 81
Figura 73 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 1º dia. 82
Figura 74 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 2º dia. 82
Figura 75 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 3º dia. 83
Figura 76 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 4º dia. 83
Figura 77 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 5º dia. 84
Figura 78 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 6º dia. 84
Figura 79 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 7º dia. 85
Figura 80 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 8º dia. 85
Figura 81 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 9º dia. 86
Figura 82 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 10º dia. 86
Figura 83 – Perfil de operação típico da unidade consumidora com GDFV (dia útil). 87
Figura 84 – Comparativo de consumo de energia elétrica no horário de ponta. 88
Figura 85 – Comparativo de consumo de energia elétrica no horário de fora de ponta. 89
Figura 86 – Energia reativa faturada no período. 90
Figura 87 – Valores faturados sobre a energia reativa no período. 91
Figura 88 – Comparativo de variação de valores faturados 2017-2018. 92
Figura 89 – Efeitos da correção do fator de potência pelo inversor. 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite de fator de potência para GDFV. 29
Tabela 2 – Requisitos mínimos em função da potência instalada. 33
Tabela 3 – Resultados mensais de uma unidade com GDFV. 45
Tabela 4 – Especificações básicas dos módulos utilizados. 76
Tabela 5 – Características básicas dos inversores utilizado. 77
Tabela 6 – Comparativo de economia de consumo de energia no período. 89
Tabela 7 – Comparativo de valores faturados por energia reativa no período. 91
Tabela 8 – Participação do valor da energia reativa na fatura de energia. 92
Tabela 9 – Comparativo de economia no período. 93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracker
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PWM	Pulse Width Modulation
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
REN	Resolução Normativa
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
THS	Tarifa horo-sazonal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 INTRODUÇÃO GERAL 13
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DA PESQUISA 18
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 18

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA 20

2.1 BREVE HISTÓRICO 20
2.2 MODELO ATUAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA 21
2.3 COMPOSIÇÃO DA GDFV 23
2.3.1 Módulo fotovoltaico 24
2.3.2 Inversor 25
2.3.3 Sistema de medição 27
2.4 FATOR DE POTÊNCIA 28
2.5 NORMAS TÉCNICAS E LEGISLAÇÕES APLICAVEIS A GDFV NO BRASIL ... 32

3 TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA 35

3.1 TARIFAÇÃO 35
3.1.1 Grupos tarifários 35
3.1.2 Postos tarifários 36
3.1.3 Estrutura tarifária 39
3.1.4 Bandeiras tarifárias 41
3.2 TRIBUTAÇÃO 42

4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA 43

4.1 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO 43
4.2 LIMITAÇÕES DE INSTALAÇÃO E COMPARATIVO ENTRE UNIDADES 44
4.3 PERFIS DE GERAÇÃO E CARGAS 46
4.3.1 Perfil de geração fotovoltaica 46
4.3.2 Perfis de cargas 46
4.4 ANÁLISE DOS MODOS DE OPERAÇÃO 49
4.4.1 Modo de Operação 1 49
4.4.2 Modo de Operação 2 54
4.4.3 Modo de Operação 3 59
4.4.4 Modo de Operação 4 61
4.4.5 Modo de Operação 5 66
4.4.6 Modo de Operação 6 71

5 ESTUDO DE CASO 75

5.1 DESCRIÇÃO DA GDFV INSTALADA 75
5.1.1 Sistema de Monitoramento e Estação Meteorológica 75
5.1.2 Módulos fotovoltaicos 75
5.1.3 Sistema de Inversão 76
5.2 PERFIL DE OPERAÇÃO 77
5.2.1 Perfil de Operação sem GDFV 77

5.2.2 Perfil de Operação com GDFV 82
5.3 COMPARATIVO DE ECONÔMIA 88
5.3.1 Comportamento do Faturamento no Consumo de Energia 88
5.3.2 Comportamento do Faturamento de Potência Reativa 90
5.3.3 Comparativo Financeiro 90
5.3.4 Custos do sistema e previsão de retorno do investimento 93
5.4 CORREÇÕES OU MELHORAMENTOS 93
5.4.1 Compensação de reativos pelo inversor 93
5.4.2 Compensação de reativos com banco de capacitores 95

6 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS 96
6.1 CONCLUSÕES GERAIS 96
6.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE 97

REFERÊNCIAS 98

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada uma breve contextualização histórica dos sistemas de energia elétrica, bem como considerações referentes à geração distribuída (GD), com ênfase para a geração distribuída fotovoltaica (GDFV), além de mostrar o panorama atual da divisão do consumo de energia e dos sistemas de geração distribuída no Brasil.

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

No final do século XIX foram implantados os primeiros sistemas de energia elétrica, os quais consistiam em redes de distribuição isoladas que atendiam uma carga e/ou conjunto de cargas específicas. Com o crescimento da demanda, tal modalidade de geração se mostrou ineficiente, principalmente no tocante à robustez e estabilidade.

A crise do petróleo na década de 1970, evidenciou que as reservas fósseis não seriam sempre de baixo custo (MME, 2007). No Brasil, a geração hidrelétrica ganha destaque na busca por diversificar a matriz de geração de energia elétrica. Tal modo de geração nem sempre encontra-se próxima aos centros de carga. Para transpor as distancias entre a geração e as cargas, redes de transmissão complexas foram estruturadas. A preocupação com a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, também são fatores que entram em discursão. No entanto, a geração de forma centralizada e a transmissão a longas distâncias apresentam desvantagens como: a contribuição para a emissão de gases poluentes, perda de potência nas linhas de transmissão.

A geração de energia de forma tradicional encontra barreiras como o esgotamento dos recursos, problemas ambientais como as emissões de dióxido de carbono, mudança ou alteração de cursos d'água que modificam a migração natural de seres aquáticos e os problemas econômicos, como a elevação dos custos de produção (STIGKA *et al*., 2014).

A preocupação da sociedade com a conservação ambiental, sustentabilidade e economia serviu de mola propulsora para a GD se destacar como uma alternativa para a geração de eletricidade, objetivando encontrar formas menos agressivas ao meio ambiente (JENKINS, 2010).

Neste sentido, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem buscado, por meio da publicação de Resoluções Normativas (REN), criar um ambiente regulatório que promova

o aumento da participação dos sistemas de geração distribuída, baseados em fontes renováveis, no atendimento da demanda nacional de eletricidade.

A publicação da REN ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu as condições para conexão de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como o sistema de compensação. Isso causou um aumento significativo na produção de energia solar no país, uma vez que o cenário ficou mais atrativo para usuários da rede interessados em instalar pequenas centrais geradoras.

De forma genérica, é possível conceituar a GD como aquela de pequeno porte, localizada próxima aos centros de carga, conectada ao sistema de distribuição ou na própria unidade consumidora (RAFA *et al*., 2008). Alguns autores associam o conceito de GD ao de tecnologias renováveis. Entretanto, não é possível limitar a GD a determinadas tecnologias, uma vez que existe a variação da disponibilidade de recursos de acordo com a localização (ACKERMAN *et al*., 2001). No país, a GD também é definida como aquela onde o despacho não é controlado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

A presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar alguns benefícios para o sistema elétrico, destacando-se a postergação de investimentos para a expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, a redução do impacto ambiental, a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga elevada e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2016).

Entretanto, existem desvantagens referentes à disseminação da conexão desses pequenos geradores na rede de distribuição, tais como: o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, a eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (ANEEL, 2016).

As complexidades da operação de sistemas com GDFV deve-se ao fato de que esta apresenta disponibilidade de geração concentrada em um período do dia. Vale ressaltar que mesmo no período de disponibilidade solar, a geração sofre variações que podem ser causadas por sombreamento, atuação do sistema de proteção entre outros. Com isso o sistema deve estar preparado para responder de maneira rápida à descontinuidade na geração fotovoltaica.

A característica intermitente dos sistemas de GDFV, a qual é inerente ao mecanismo de geração fotovoltaica, resulta em custos adicionais para o sistema elétrico tradicional. O sombreamento, por exemplo, pode acarretar uma redução abrupta da potência injetada ou demandada da rede. Sendo assim, dado que estas fontes estão suscetíveis a grandes variações de potência em um curto período, há a necessidade de reforço em centrais de geração de

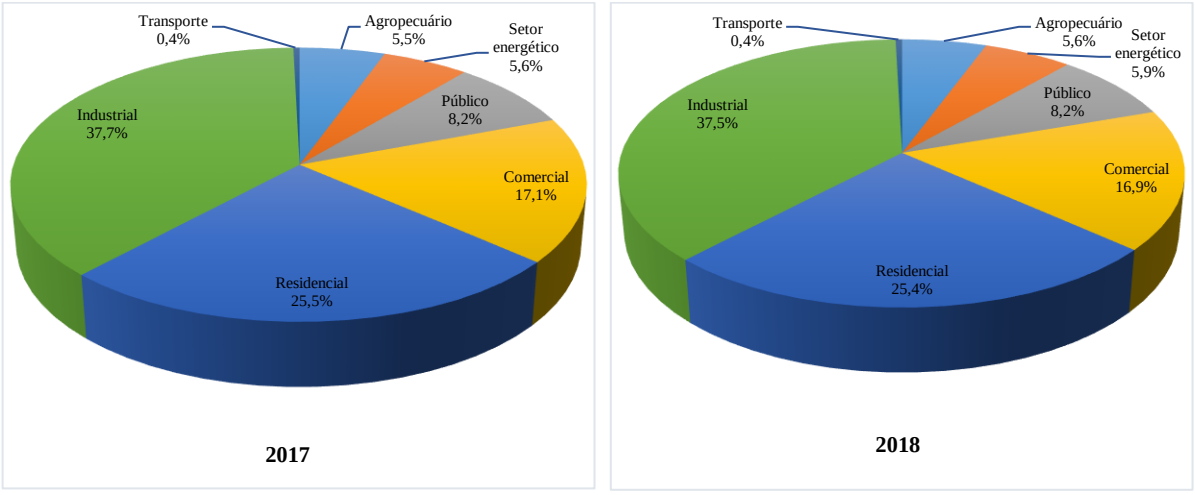
resposta rápida, operando em modo flutuante, exercendo função de suporte de geração e auxílio no controle da frequência do sistema, evitando impactos em aspectos técnicos de qualidade da energia elétrica.

Diversas mudanças vêm ocorrendo no sistema elétrico com o objetivo de atender os consumidores de energia elétrica com maior qualidade, eficiência e continuidade do fornecimento. Dentre estas mudanças, cita-se a implantação do Sistema Interligado Nacional (SIN), que é caracterizado por ser um sistema de operação centralizada a cargo do ONS.

A elevação da demanda em determinadas horas do dia contribui para o aumento do valor do custo da energia elétrica, uma vez que o sistema elétrico precisará estar preparado para suprir a demanda durante estes horários de pico no consumo de eletricidade. A tarifa horária foi uma solução encontrada para tentar interferir no padrão de consumo de energia elétrica. A aplicação da tarifa horária tem por objetivo a redução da concentração da demanda de eletricidade ao longo do dia, de tal forma a atenuar os picos de consumo e reduzir os custos (NEWSHAMA; BOWKER, 2010). No Brasil, a tarifa horo-sazonal (THS) tem como objetivo a redução de consumo da classe industrial nos horários de pico em dias úteis, por meio da aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência.

A **Figura 1** apresenta a participação dos setores no consumo de eletricidade no Brasil nos anos de 2017 e 2018. Analisando os resultados apresentados, constata-se que mais de 70% do consumo de energia elétrica no país ocorre em unidades onde o sistema tarifário abrange contratação de demanda, tarifas diferenciadas ponta e fora de ponta e cobrança sobre violação dos limites de potência reativa trocada com a rede.

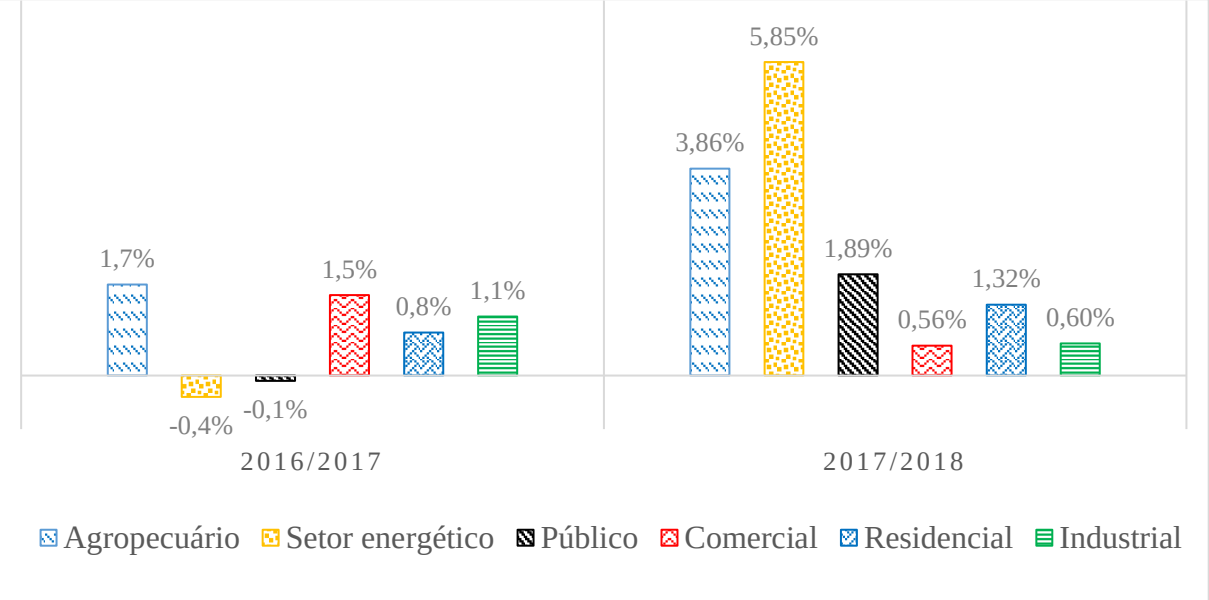
Figura 1 – Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil.



Fonte: (EPE, 2018) e (EPE, 2019)

Realizando a comparação com o ano de 2016, verificou-se uma evolução no consumo total de energia elétrica da ordem de 0,9%, com destaque para o setor agropecuário, com um crescimento de 1,7% e o setor comercial, com um crescimento de 1,5% (EPE, 2018). No ano de 2018, ocorreu uma redução da ordem de 1% no consumo total em comparação ao ano de 2017. A Figura 2 mostra a variação do consumo setorial de energia elétrica.

Figura 2 – Variação do consumo setorial de eletricidade no Brasil.

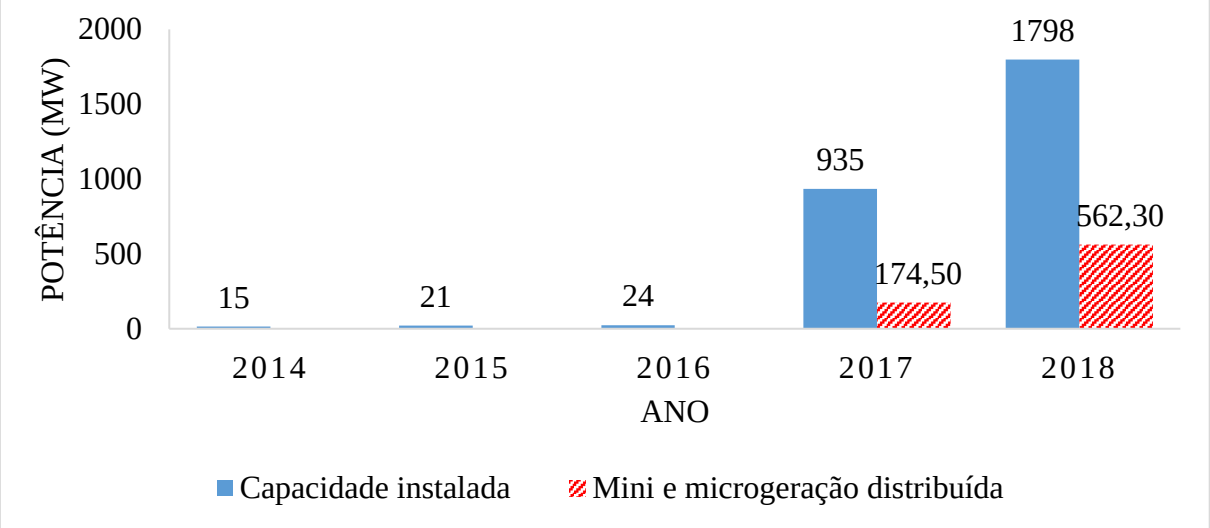


Fonte: (EPE, 2018) e (EPE, 2019).

A expansão da geração distribuída em uma determinada região provoca o aumento do grau de complexidade dos procedimentos de operação e manutenção da rede local, assim como das medidas de segurança e planejamento do sistema. Consequentemente, isto eleva os investimentos nos sistemas de proteção e controle, sobretudo para a rede de baixa tensão. (FALCÃO, 2013).

O Brasil possuía em 2018 uma capacidade instalada de geração fotovoltaica da ordem de 1798 MW, apresentando elevação de 92,2% em relação ao ano de 2017. A micro e minigeração distribuída possui parcela considerável deste total, atingindo a capacidade instalada de 562,3 MW, apresentando uma elevação de 322,2% (EPE, 2018; EPE, 2019), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Capacidade instalada de energia solar fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de EPE (2018 e 2019)

No ano de 2018, registrou-se uma elevação da ordem de 131% no número de unidades de micro e minigeração distribuída, sendo a fonte solar responsável por 63,5% do total. Tal percentual foi alavancado pelo crescimento da geração fotovoltaica da ordem de 3461 GWh, apresentando um crescimento de 316,1% em relação ao ano de 2017. Isso colocou a fonte solar como responsável por 0,54% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2019).

Deste modo, observa-se uma consolidação dos sistemas de GDFV, uma vez que boa parte do território nacional oferece excelentes condições climáticas para a geração fotovoltaica. Contudo, tal condição trará desafios técnicos, econômicos e regulatórios ao setor elétrico, que demandará desenvolvimento de pesquisas que servirão de base no desenvolvimento de redes elétricas mais eficientes e confiáveis.

O aumento da participação de unidades de GD leva a uma queda no consumo da energia elétrica disponibilizada pela distribuidora, o que pode resultar em um aumento da tarifa, devido ao rateio dos custos para um mercado remanescente menor. A elevação da tarifa, por sua vez, pode gerar maior atratividade pelos sistemas de GD e, consequentemente, aumentar as suas vendas, o que pode provocar uma redução do custo da tecnologia por meio de ganhos de escala e, desta forma, acelerar a sua difusão (CASTRO, 2017).

Neste cenário de expansão, os impactos na qualidade da energia causados pela alta penetração de GDFV não podem ser descartados. Tal problemática tem sido tema de estudos realizados em diversos países, como nos Estados Unidos, na Espanha, Itália e Alemanha.

No Brasil, por força de normas regulamentadoras, os sistemas de GDFV devem atender vários requisitos de segurança e operação. Dentre eles destacam-se: controle de tensão, frequência e fator de potência. Por essa razão este trabalho será direcionado ao estudo dos impactos causados nas unidades consumidoras com GDFV instalada, com enfoque na compensação de reativos. Do ponto de vista da concessionária esta compensação é realizada objetivando disponibilizar energia elétrica com alta qualidade. Visto pelo consumidor, a compensação de reativos é fixada por força da regulatória, onde são estabelecidos limites de absorção e injeção de potência reativa demandada da rede.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DA PESQUISA

Este trabalho foi motivado pelo crescimento da contribuição da GDFV na matriz elétrica brasileira, como também devido às características diferenciadas do sistema de tarifação aplicadas às unidades estudadas. Outro motivo deve-se ao crescimento da participação no consumo de eletricidade no Brasil no setor onde encontram-se enquadradas as unidades consumidoras estudas, bem como o aumento da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica.

Assim sendo, devido à elevação da contribuição dos sistemas de GDFV na matriz energética nacional, este trabalho tem por objetivo analisar o impacto técnico regulatório tarifário nos consumidores brasileiros que possuem a GDFV instalada e estão sujeitos à cobrança de reativos. Para tanto são apresentadas as curvas de comportamento de funcionamento de unidades consumidoras fictícias com perfis de cargas típicos em dias normais de funcionamento e em dias de feriado e finais de semana. Também é realizado um estudo de caso em uma unidade real com o objetivo de analisar o problema em uma situação prática. Como isso busca-se aferir as vantagens e/ou desvantagens da instalação de GDFV, nesse tipo de unidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. A ordem dos capítulos tem o propósito de conduzir à contextualização da temática, objetivando a melhor compreensão do tema.

Este primeiro capítulo é introdutório e apresenta o panorama atual da divisão do consumo de energia e dos sistemas de geração distribuída no Brasil, identificando o objeto da pesquisa.

O capítulo 2 aborda as definições e os conceitos sobre a GDFV com ênfase nas topologias, modos de operação, categorias e formas de conexão ao sistema elétrico. Também apresenta a avaliação dos impactos negativos provocados pelos sistemas de GDFV sobre os sistemas elétricos e os principais requisitos de qualidade e segurança para conexão à rede.

O capítulo 3 tem como foco o sistema de compensação, as limitações para a instalação de GDFV, bem como as categorias tarifarias utilizadas para o grupo tarifário estudado.

O capítulo 4 apresenta simulações de operação, enfatizando as possíveis alterações causadas do ponto de vista do consumidor

No capítulo 5 é realizado um estudo de caso em uma unidade consumidora real com GDFV instalada. São apresentadas as características de consumo, funcionamento e o grupo tarifário ao qual está enquadrada. Também são avaliados os pontos positivos e negativos da utilização da GDFV, além de possíveis melhoramentos a serem implementados.

No capítulo 6, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, comentários gerais a respeito das simulações realizadas, resultados alcançados e a proposta para trabalhos futuros e as referências bibliográficas que serviram de suporte para elaboração deste trabalho de pesquisa.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

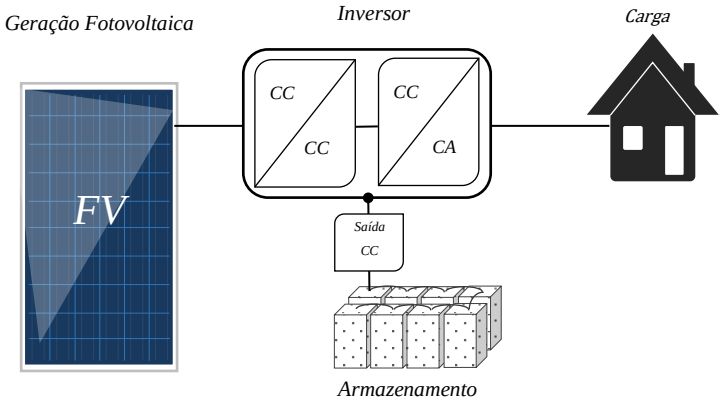
Neste capitulo serão apresentados conceitos relativos à geração distribuída proveniente de uma fonte renovável, em especial a GDFV. Neste sentido serão apresentados um breve histórico da geração fotovoltaica no Brasil, configurações de instalações, formas de operação e a legislação aplicada.

2.1 BREVE HISTÓRICO

A expansão dos sistemas de distribuição proveniente da geração de forma centralizada, não garante o atendimento de localidades distantes da rede de distribuição. Aqui, consideram-se isoladas unidades ou grupo de unidades distantes entre si e/ou do sistema de distribuição, em que a relação custo benefício é a principal barreira para conectá-los através do sistema de distribuição.

No Brasil foram utilizadas algumas soluções para o atendimento em comunidades isoladas, em localidades onde até então não era possível o atendimento por meio da rede de distribuição de energia. Um desses modos de atendimento foi a instalação de kits fotovoltaicos compostos por um conjunto de módulos fotovoltaicos, um controlador de carga, um banco de baterias e um inversor, conforme ilustra na Figura 4.

Figura 4 – Sistema fotovoltaico isolado.



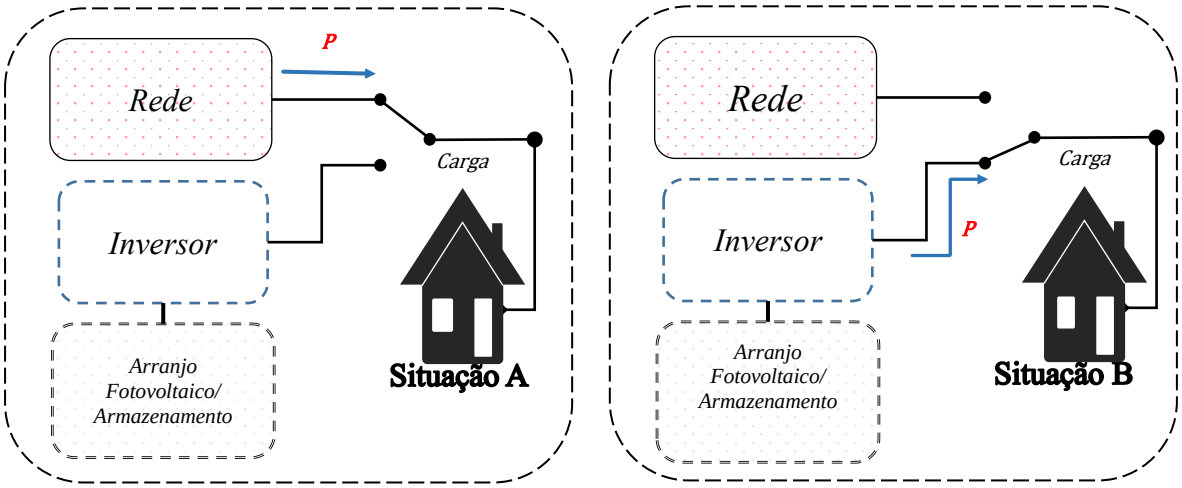
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Neste sistema o inversor é responsável em converter a tensão em corrente continua (CC) gerada pelo arranjo fotovoltaico em corrente alternada (CA) utilizada na alimentação das cargas, além de condicionar o nível CC que alimenta o sistema de armazenamento.

Um dos principais problemas neste tipo de instalação é a limitação no que diz respeito a novas cargas, além do que foi previamente projetado, impondo restrição para a unidade consumidora.

No que se refere às unidades atendidas pela rede de distribuição, caso optasse por geração própria, deveria a geração ser desacoplada da rede da concessionaria de energia elétrica, ficando impossibilitadas de injetar a sua produção excedente no sistema de distribuição, o que tornava o sistema não atrativo economicamente, sendo utilizado apenas como forma de *backup*, suprindo alguma necessidade da unidade consumidora. Conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – GD impossibilitado de conectar-se à rede.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 5, no modo de funcionamento do sistema fotovoltaico impossibilitado de conectar-se à rede da concessionária, conforme ilustra a situação A, a carga é atendida exclusivamente pela rede, e na situação B, atendida pela unidade de geração e desconectada do sistema de distribuição. Tal situação, foi parcialmente dirimida pela Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/2012, que possibilita a conexão de unidades de geração distribuída à rede, com possibilidade de injeção de energia para posterior utilização do excedente gerado (ANEEL, 2012).

2.2 MODELO ATUAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

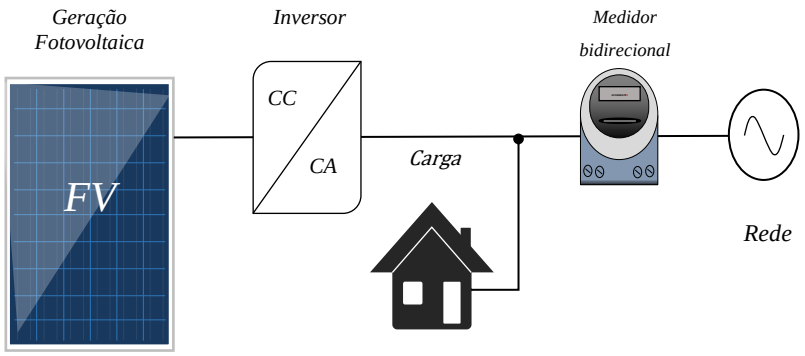
O Decreto nº 5.163, de 2004, classifica a geração distribuída como aquela conectada diretamente no sistema elétrico de distribuição do lado consumidor, com geração a partir de fontes renováveis de energia ou de cogeração com eficiência energética maior ou igual a 75%, e com potência instalada inferior a 30 MW (BRASIL, 2004).

Dentro da classificação definida, a GD pode ser vista sob duas vertentes:

- Reserva de Energia - funciona com um parque descentralizado para alimentação exclusiva da edificação, objetivando suprir eventuais falhas do fornecimento da rede, conter violações dos limites de qualidade de energia e/ou excesso de demanda;
- Fonte de Energia - conectada à rede de distribuição, por meio de instalações de unidades consumidoras, podendo se comportar, em determinados momentos, como consumidor ou produtor de energia. Tal modelo foi incentivado pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL.

A Figura 6 apresenta um sistema que dispensa a utilização do sistema de armazenamento tradicional, uma vez que a rede elétrica de distribuição faz o papel de fornecer energia à carga quando o GDFV não suprir a demanda da unidade consumidora.

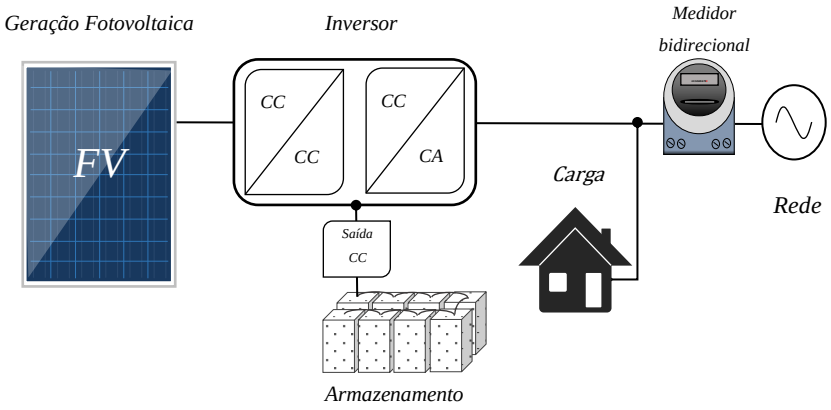
Figura 6 – GDFV sem armazenamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A norma exige que, caso ocorra falha na rede da concessionária, o inversor deve ser capaz de detectar a ausência do sinal de tensão da rede e desconectar a carga e o inversor do sistema, mesmo que o sistema fotovoltaico seja capaz de suprir a demanda de energia local. Tal exigência justifica-se para garantir a segurança de funcionários durante uma eventual manutenção na rede ou mesmo para evitar a energização de um circuito da rede isolado pelo sistema de proteção devido a uma condição indevida, como também para preservar o próprio inversor (FORTES, 2016).

Figura 7 – GDFV com armazenamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As Figuras 6 e 7 apresentam um modelo de GDFV com ou sem armazenamento. A possibilidade coloca o inversor em evidência, pois a conexão à rede traz consigo uma série de exigências que anteriormente, em sistema isolados, não eram levadas em consideração, tais como: sincronismo de tensão, frequência e dispositivos anti-ilhamento.

No Brasil, a GDFV pode ser instalada em qualquer tipo de consumidor. Sua função é atuar como fonte complementar ao sistema de distribuição ao qual está conectada, sendo classificada em função da capacidade de produção de energia (ANEEL, 2015):

- Microgeração: Potência instalada até 75kW;
- Minigeração: Potência instalada acima de 75kW até 5MW;
- Usinas de geração: potência acima de 5MW.

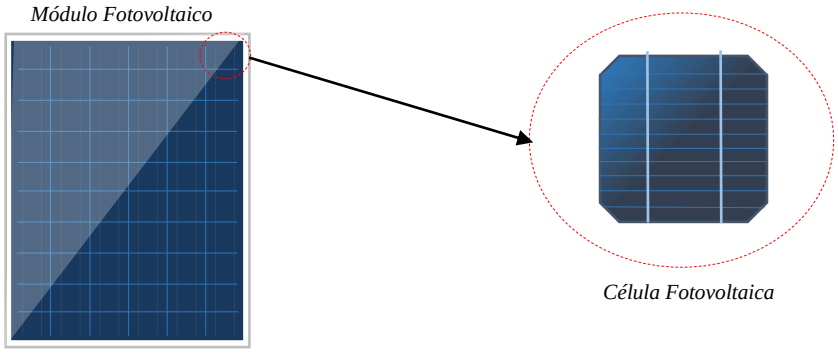
2.3 COMPOSIÇÃO DA GDFV

Um sistema de GDFV basicamente é composto por módulos fotovoltaicos que utilizam a energia luminosa do sol para produção de energia elétrica em corrente contínua e por um sistema conversor responsável pela interface desse sistema com a rede elétrica. Esse equipamento possui em sua construção dispositivos que lhe conferem uma característica não-linear (ZILLES *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2018). São eles que realizam conversão estática da tensão em CC para CA. Devido a essa característica podem trazer alguns impactos negativos na qualidade da energia fornecida pela rede principal, tais como distorção harmônica e flutuação de tensão. Por conta desses efeitos os inversores de GD têm chamado a atenção de concessionárias e pesquisadores da área com o objetivo de avaliar tais impactos, considerando que os requisitos de qualidade da energia estão cada vez mais rigorosos (FORTES, 2018).

2.3.1 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico consiste do arranjo formado por células fotovoltaicas conectadas em série e/ou paralelo objetivando a produção de tensão suficiente para a utilização prática da energia, bem como materiais que propiciam a proteção mecânica e contra as intempéries.

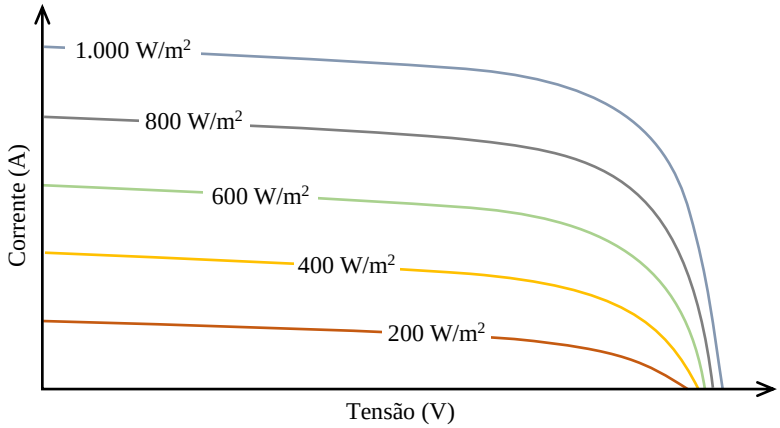
Figura 8 – Modulo fotovoltaico.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de 1000W/m² e temperatura de 25ºC na célula. A taxa de irradiação incidente sobre um arranjo fotovoltaico varia dependendo de vários fatores como a posição geográfica, hora do dia, temperatura, humidade, ângulo de inclinação e sombreamento (FORTES, 2018). Na Figura 9 é ilustrado o comportamento do efeito da variação da irradiância solar sobre a curva característica I-V.

Figura 9 – Efeito da variação da irradiância solar sobre a curva característica I-V.

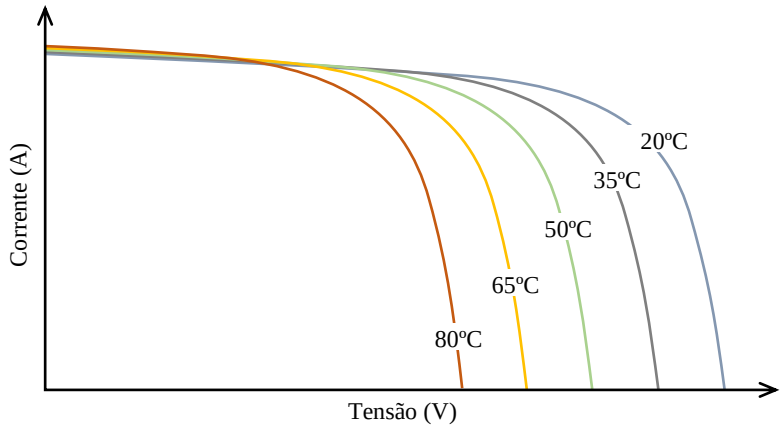


Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014).

Por outro lado, a alteração na temperatura sobre as células fotovoltaicas tem impacto direto. Quando ocorre um aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto diminui, ao

passo que a corrente de curto-circuito permanece praticamente inalterada. Na Figura 10 é ilustrado o comportamento das curvas do efeito da temperatura em uma célula fotovoltaica para diferentes temperaturas e radiação constante (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 10 – Efeito da temperatura das células sobre a curva característica I-V.



Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014).

2.3.2 Inversor

Neste tópico serão abordados os inversores utilizados em GDFV. Tais equipamentos possuem diversas características e funções. Uma delas está relacionada ao isolamento elétrico entre a entrada e a saída, caracterizando os inversores como isolados e não isolados. O isolamento elétrico é normalmente implementado utilizando-se transformadores, que podem ser de baixa ou de alta frequência. Além disso, o inversor é responsável por compatibilizar o nível de tensão fornecida pelo gerador fotovoltaico, em CC, com as mesmas características da rede elétrica de distribuição, tais como: tensão, frequência, forma de onda e qualidade de energia elétrica, bem como realizar acoplamento e gerenciamento da conexão. Além de incorporar funções de controle, como seguimento do ponto de potência máxima (MPPT) do gerador fotovoltaico, conexão e desconexão da rede em função das condições desta e da radiação incidente sobre o gerador fotovoltaico, detecção de perdas de isolamento, dentre outras funções que variam de acordo com cada projeto (FORTES, 2016).

Os inversores utilizados em GDFV são construídos utilizando transistores, geralmente IGBT ou MOSFET, dependendo da velocidade de chaveamento e dos níveis de potência e tensão. Utilizam controle de modulação por largura de pulso (PWM), o que permite um controle sobre a forma de onda e o valor da tensão de saída (PRIEB, 2011). Também devem atender a regulamentação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema

Elétrico Nacional – PRODIST, módulo 3 que indica os requisitos mínimos do ponto de conexão dos sistemas de micro e minigeração distribuída à rede elétrica da concessionária (ANEEL, 2016).

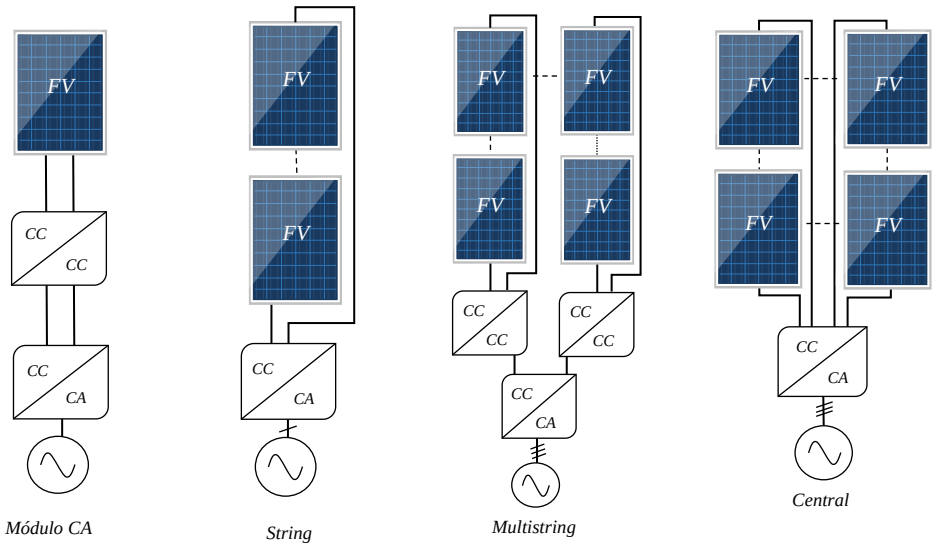
Esses equipamentos caracterizam-se também pelas topologias dos conversores empregados, uma vez que a tensão do lado CC dos inversores de GDFV pode variar em um amplo intervalo.

Quanto aos estágios de conversão pode-se dividir os inversores aplicados à GDFV em estágio único e múltiplos estágios. Os inversores de único estágio apresentam menos componentes quando comparados com outras configurações, o que leva a uma diminuição no custo, além de proporcionar maior confiabilidade e robustez. Entretanto, uma vez que a frequência de linha é baixa, os transformadores possuem grande volume e peso. Com isso, estão sendo substituídos por configurações com transformadores de alta frequência (XUE, 2004).

Conforme Pinho e Galdino (2014), pode-se classificar os inversores de GDFV nos seguintes tipos:

- Inversores Centrais – inversores trifásicos de grande porte, com potência que varia na faixa entre centenas de kWp até MWp, normalmente utilizados em Usinas Fotovoltaicas (UFVs);
- Inversores *multistring* – inversores trifásicos ou monofásicos dotados de várias entradas independentes com seguimento do ponto de potência máxima, da sigla em inglês (MPPT) para conexão de *strings* (fileiras) de módulos. São adequados a instalações urbanas (telhados, fachadas) nas quais cada *string* pode estar submetida a diferentes condições de irradiância e/ou sombreamento. Tem potência na faixa de dezenas de kWp;
- Inversores de *String* – inversores monofásicos dotados de apenas uma entrada MPPT, adequados a instalações de micro geração (até 10kWp);
- Módulo CA – módulo fotovoltaico associado a um conversor CC/CA.

Figura 11 – Classificação de inversores de GDFV.



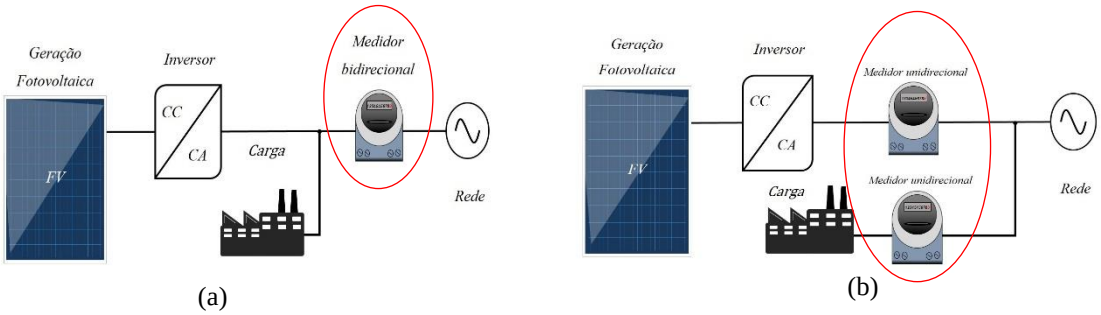
Fonte: Adaptado de ARAÚJO; ZACHARIAS; MALLWITZ, 2010.

Os inversores de GDFV utilizados no Brasil devem atender aos requisitos de proteção exigidos no item 5 da seção 3.3 do módulo 3 do Prodist, o que inclui a proteção anti-ilhamento e a exigência de transformador de acoplamento, entre outras (PINHO; GALDINO, 2014). Este é um algoritmo importante, presente nos inversores de GDFV, que lhe possibilita detectar a situação de falha no fornecimento de energia elétrica da concessionária, desconectando-o da rede por questão de segurança (ABNT, 2014). Caso seja necessário realizar a manutenção na rede de distribuição adjacente ao ponto de conexão comum, a concessionária irá desligá-la para que o técnico possa ter acesso à mesma. Porém, estando ainda ligado o fornecimento de potência ao ponto de conexão pelo sistema fotovoltaico, o técnico ficará exposto a uma rede energizada. O mesmo ocorre para o caso de rompimento de condutores aéreos ou queda do posteamento, onde o inversor deve atuar de forma a garantir o anti-ilhamento, assegurando a proteção das pessoas que porventura venham a ter contato com esta parte da rede.

2.3.3 Sistema de medição

Para as unidades com GD instalada, o medidor poderá ser do tipo bidirecional ou dois medidores unidirecionais, como mostrado na Figura 12.

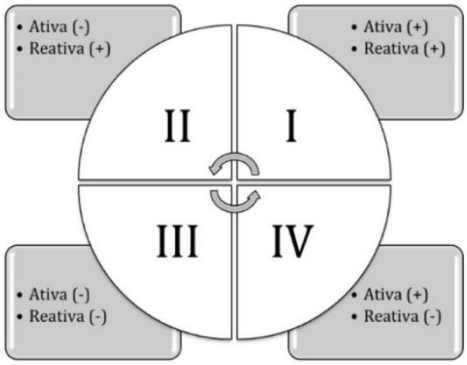
Figura 12 – Sistemas de medição: (a) um bidirecional e (b) dois medidores unidirecionais.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede. Esse tipo de medidor é aplicado para microgeração distribuída com potência menor ou igual a 75 kW. Para GD com potência superior a 75 kW, o medidor deve ser de 4 quadrantes, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Sistema de medição em quatro quadrantes.



Fonte: SIQUEIRA *et al.*, 2014.

Para os casos em análise os sistemas de medição devem considerar também o horário de consumo ou injeção.

2.4 FATOR DE POTÊNCIA

Os inversores com controle por corrente são capazes de regular a defasagem entre a corrente CA de saída em relação à tensão da rede. Essa defasagem é regulada de modo que o fator de potência seja próximo do valor unitário, ou seja, a corrente está em fase com a tensão da rede. Em muitos casos, o valor unitário não é atingindo devido à influência da distorção harmônica da corrente de saída dos inversores no valor do fator de potência (FORTES, 2016). A recomendação da norma Brasileira ABNT NBR 16.149/2013 é que o inversor de GDFV

seja capaz de operar com fator de potência em uma determinada faixa quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do gerador. Os valores recomendados de fator de potência são apresentados na Tabela 1. Caso seja ultrapassado esse valor, o inversor deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para corresponder ao FP predefinido (ABNT, 2014).

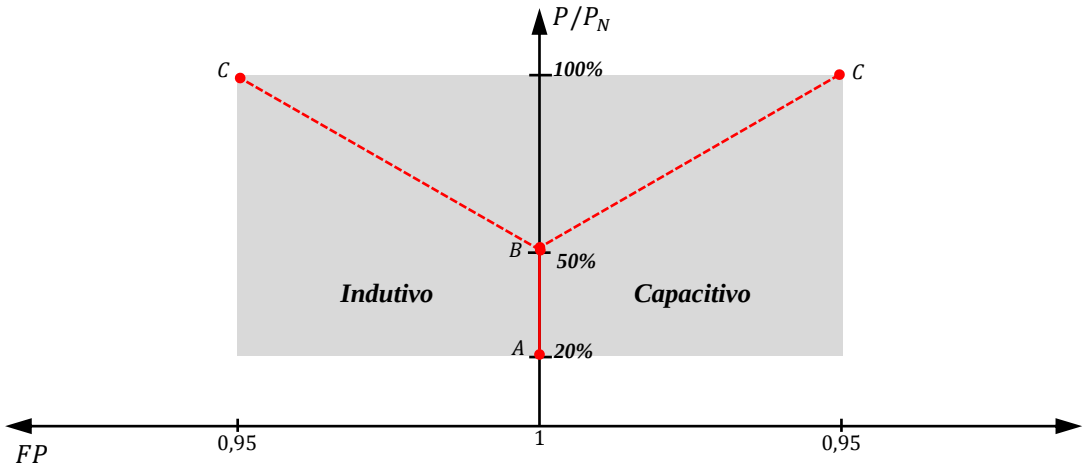
Tabela 1 – Limite de fator de potência para GDFV.

Potência do inversor	Ajuste de fábrica	Tolerância
Até 3kW	FP unitário	0,98 (indutivo ou capacitivo)
Entre 3kW e 6 kW	FP unitário	0,95 (indutivo ou capacitivo)
Maior que 6 kW	FP unitário ou Ajustável	0,90 (indutivo ou capacitivo)

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Após ultrapassar a potência de 20% da potência nominal, o inversor de GDFV deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para FP predefinido, em um tempo de no máximo 10 segundos, conforme recomendado pela norma (ABNT, 2014). A norma que determina o ajuste do FP do inversor apenas quando o limite operacional de 20% de sua potência nominal for ultrapassado, deve-se à estratégia de controle da maioria destes conversores não conseguir encontrar ponto de operação eficiente para entregar uma corrente elétrica com baixo conteúdo harmônico na saída quando opera abaixo deste nível de potência (FORTES, 2018). A Figura 14 apresenta os limites operacionais do fator de potência para inversores de GDFV, com potência nominal entre 3kW e 6kW.

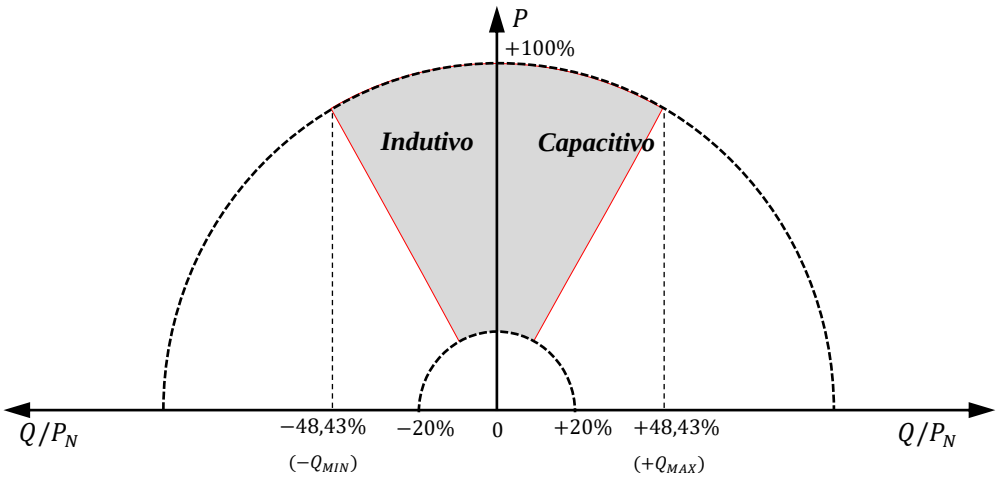
Figura 14 – Limite operacional de fator de potência para GDFV entre 3kW e 6kW



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Conforme apresentado na Tabela 1, a faixa de operação do fator de potência nos inversores de potência nominal acima de 6kW, deve ser ajustável de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo, conforme prescreve a norma (ABNT, 2014), ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Limites operacionais de fator de potência para GDFV acima de 6kW



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Conforme ilustrado na Figura 15, o inversor pode operar com FP sem restrição enquanto a geração não ultrapassar 20% da potência nominal do inversor. Quando a potência ativa gerada ultrapassar os 20% da potência nominal do inversor, o limite de operação deve ser regulado automaticamente para 48,43%, como forma de atender o que especifica a norma, conforme pode ser confirmado em (2).

$$cos\,\varphi = \frac{P}{S} \rightarrow \tan\varphi = \frac{Q}{P} \rightarrow \tan\varphi = \frac{48{,}43}{100} \rightarrow \varphi = 25{,}91 \rightarrow \cos\varphi = 0{,}90 \qquad (1)$$

Onde:

P – Potência ativa;

S – Potência aparente;

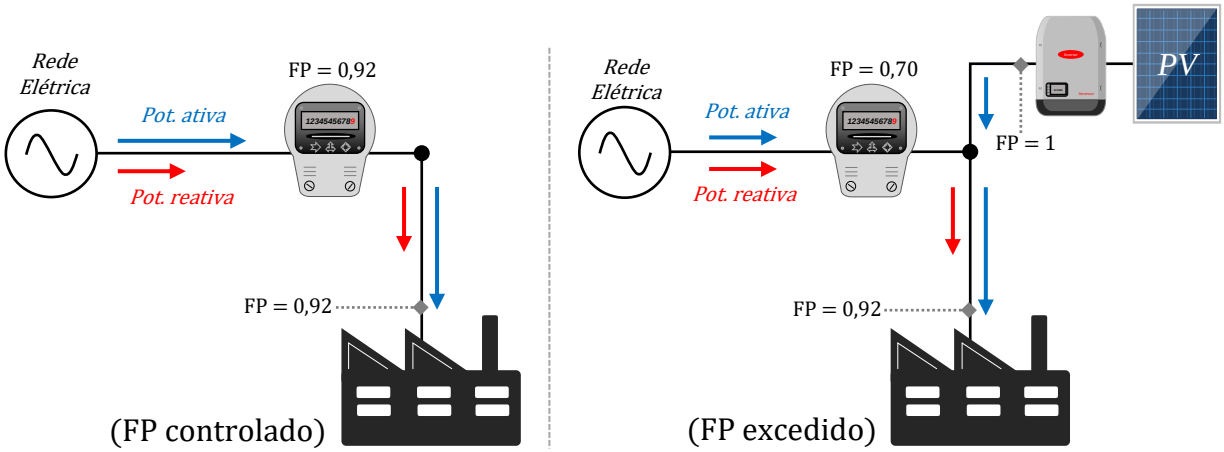
Q – Potência reativa.

Esse modo de operação recomendado pela norma pode ser fruto de preocupação para consumidores sujeitos ao faturamento de excedentes de reativos. Inversores operando com fator de potência unitário irão produzir somente potência ativa e entregá-la prioritariamente ao consumo local, reduzindo o consumo de energia ativa da rede, porém, mantendo demanda de reativos da rede. No Brasil o fator de potência é calculado pela razão da potência ativa e da potência aparente, conforme equação (2).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2)$$

Do ponto de vista do consumidor, a GDFV tem como principal objetivo reduzir os valores pagos à concessionária de energia. Neste escopo, a cobrança de excedente de reativos impactará diretamente no retorno de investimento. A Figura 16 ilustra dois sistemas, um com controle de fator de potência e outro sem tal controle.

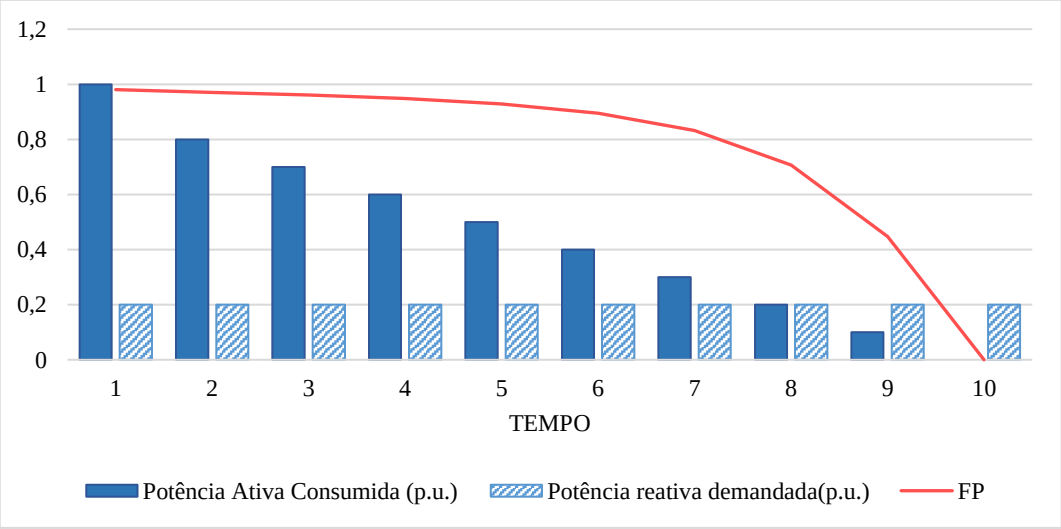
Figura 16 – Fator de potência de instalações com GDFV e demanda de reativos



Fonte: (FORTES, 2018).

Assim, caso uma planta deixe de consumir potência ativa, mas mantenha o consumo de reativos, acarretará na diminuição do fator de potência, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Fator de potência visto pela medição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nesse exemplo ilustrativo a potência reativa demandada da rede é a mesma com ou sem a geração fotovoltaica. Com isso verifica-se que o fator de potência registrado viola os limites estabelecido na legislação em vigor, o que acarretará em cobrança pela violação dos limites. Considerando que a quantidade de potência reativa demanda é a mesma com ou sem a geração fotovoltaica, o consumidor arcará com um pagamento que poderia ser suprido se o inversor realizasse a compensação de reativos.

2.5 NORMAS TÉCNICAS E LEGISLAÇÕES APLICÁVEIS À GDFV NO BRASIL

Nesta seção serão apresentadas as principais normativas, que regem a geração distribuída no Brasil.

- Decreto 5.163 de 30 de julho de 2004 - Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências;
- Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 - Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada;
- Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 da ANEEL- Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências;

Além disso, os inversores fotovoltaicos para uso comercial devem ser certificados conforme o "Programa Brasileiro de Etiquetagem" do Inmetro. Esta recomendação vale tanto para os inversores fabricados no Brasil como para os fabricados no exterior.

As portarias do INMETRO números 004/2011 e 357/2014 apresentam normas, procedimentos e condicionantes mínimas de ensaios em equipamentos para energia fotovoltaica (módulo, controlador de carga, inversor e bateria), de conexão à rede.

Para uma unidade se conectar à rede de distribuição no Brasil, os equipamentos utilizados na implantação do projeto devem atender a regulamentação do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Para o caso de inversores, o módulo 3 do PRODIST indica os requisitos mínimos do ponto de conexão dos sistemas de micro e mini geração distribuída à rede elétrica da concessionária. Estes requisitos precisam

ser obedecidos para o caso de instalação de GDFV (ANEEL, 2016). Tais critérios dependem da potência de cada fonte de geração, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.

Equipamento	***Potência Instalada***		
	Até 75kW	**75kW a 500kW**	**500kW a 5MW**
Elemento de desconexão.(1)	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção.(2)	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento.(3)	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobre tensão	Sim.(4)	Sim.(4)	Sim
Proteção de sub e sobre frequência	Sim.(4)	Sim.(4)	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobre Corrente direcional	Não	Não	Sim
Sobre corrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim.(5)	Sim.(5)	Sim.(5)
Anti-ilhamento	Sim.(6)	Sim.(6)	Sim.(6)
Medição	Medidor bidirecional	Medidor de quatro quadrantes	Medidor de quatro quadrantes

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016

Os índices apresentados na Tabela 2, estão definidos no modulo 3 do PRODIST em Aneel (2016), conforme segue:

- (1) Chave seccionadora visível e acessível que a concessionária usa para garantir a desconexão da central geradora durante manutenção em seu sistema, exceto para micro geradores e mini geradores que se conectam à rede através de inversores, onde estes devem estar instalados em locais apropriados de fácil acesso. As proteções relacionadas na Tabela 2 podem estar inseridas nos referidos equipamentos, sendo a redundância de proteções desnecessária para micro geração distribuída;
- (2) Elemento de interrupção automático acionado por proteção para micro geradores distribuídos e por comando e/ou proteção para mini geradores distribuídos;
- (3) Transformador de interface entre a unidade consumidora e rede de distribuição;

- (4) Não é necessário relé de proteção específico, mas um sistema eletroeletrônico que detecte tais anomalias e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção;
- (5) Não é necessário relé de sincronismo específico, mas um sistema eletroeletrônico que realize o sincronismo com a frequência da rede e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, de maneira que somente ocorra a conexão com a rede após o sincronismo ter sido atingido;
- (6) No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento;
- (7) O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede.

3 TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A Resolução nº 414 de 2010 da ANEEL define tarifa como o valor fixado em unidade monetária por unidade de energia elétrica ativa ou da demanda de potência ativa (ANEEL, 2010).

3.1 TARIFAÇÃO

No que se refere às tarifas de energia elétrica, existem diferenças entre a terminologia nacional e a internacional, onde a tarifa é geralmente definida como um algoritmo que determina o valor das faturas dos consumidores em função do consumo de produtos ou serviços de uma empresa. No caso nacional, a tarifa está vinculada aos preços de transporte e de consumo de energia que são definidos pelo órgão regulador e são classificadas como (ANEEL, 2010):

- Monômia - constituída por valor monetário aplicável unicamente ao consumo de energia elétrica ativa;
- Binômia - constituída por valores monetários aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável.

3.1.1 Grupos tarifários

No Brasil, as unidades consumidoras são classificadas nos grupos A e B. Tais agrupamentos foram definidos prioritariamente levando-se em consideração o nível de tensão em que são atendidos. Cada grupo encontra-se dividido em subgrupos dependendo do ramo de atividade do consumidor.

No grupo A estão as unidades atendidas em tensão acima de 2300 V, sendo a tarifa binômia utilizada. A divisão em subgrupos é de acordo com a tensão de atendimento (ANEEL, 2010).

- Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou mais;
- Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 kV a 138 kV;
- Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV;
- Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 kV a 44 kV;
- Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 kV a 25 kV;
- Subgrupo AS para sistemas subterrâneos.

As unidades enquadradas neste grupo possuem três estruturas tarifárias: convencional; verde e azul. Cada unidade faz a opção da estrutura tarifária à qual quer ser submetida. Contudo, não é permitido o ingresso na estrutura tarifária convencional, uma vez que esta encontra-se em processo de extinção (ANEEL, 2010).

No grupo B estão as unidades consumidoras atendidas com tensão abaixo de 2.300 V, sendo a tarifa monômia utilizada. Neste grupo, a divisão em subgrupos dá-se de acordo com a atividade do consumidor (ANEEL, 2010).

- Subgrupo B1 – residencial e residencial de baixa renda;
- Subgrupo B2 – rural e cooperativa de eletrificação rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

As unidades enquadradas neste grupo possuem duas estruturas tarifárias: convencional e branca. Cada unidade faz a opção da estrutura tarifária à qual quer ser submetida (ANEEL, 2010).

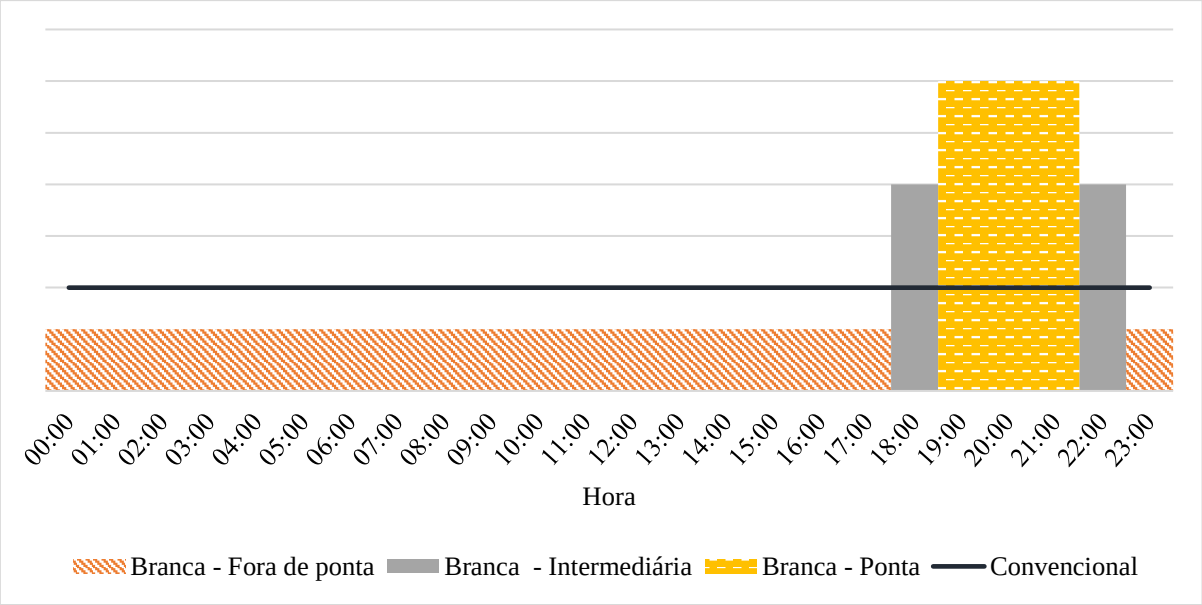
3.1.2 Postos tarifários

A REN nº 414/2010, regulamenta os postos tarifários. Tais postos são definidos para permitir a contratação e o faturamento da energia e da demanda de potência diferenciada ao longo do dia. Dependendo da modalidade tarifária aplicada ao consumidor, os postos tarifários são assim definidos:

- Horário de ponta – período composto por 3 (três) horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico. Este período deve ser aprovado pela ANEEL e será válido para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos, e feriados nacionais;
- Horário fora de ponta – período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta e intermediário no caso da Tarifa Branca;
- Horário intermediário – período de horas conjugadas ao horário de ponta, aplicado exclusivamente às unidades consumidoras optantes pela Tarifa Branca.

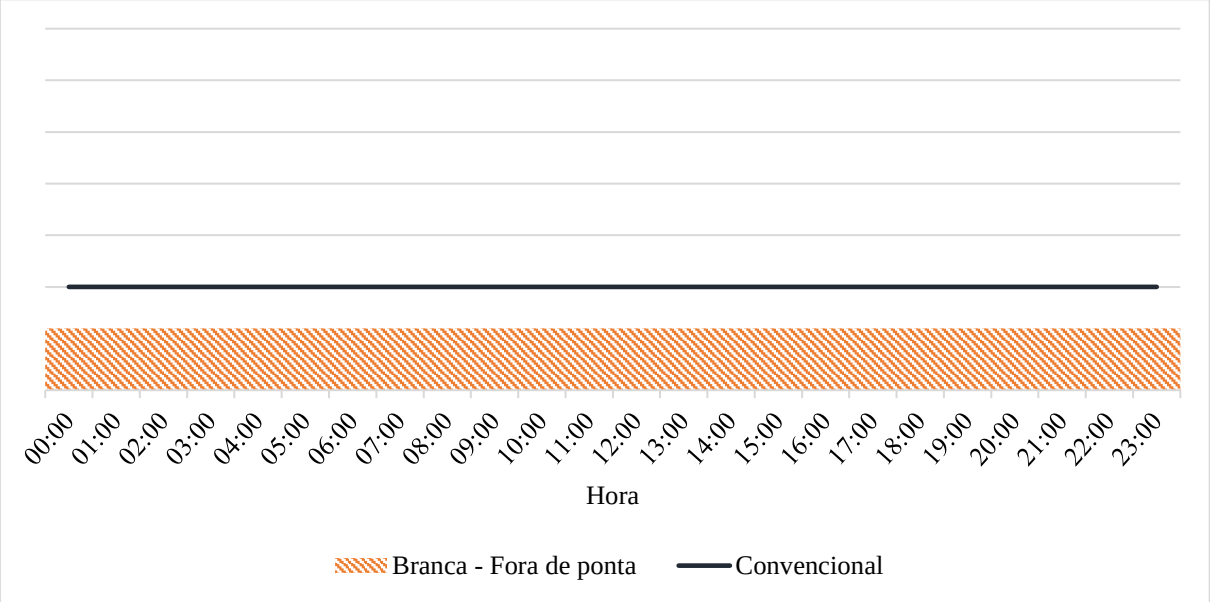
As Figuras 18 à 22, apresentam os modelos de tarifas horárias aplicadas às unidades consumidoras do país.

Figura 18 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo B (dias úteis)



Fonte: Adaptado de ANEEL (2010).

Figura 19 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo B (sábados, domingos e feriados)

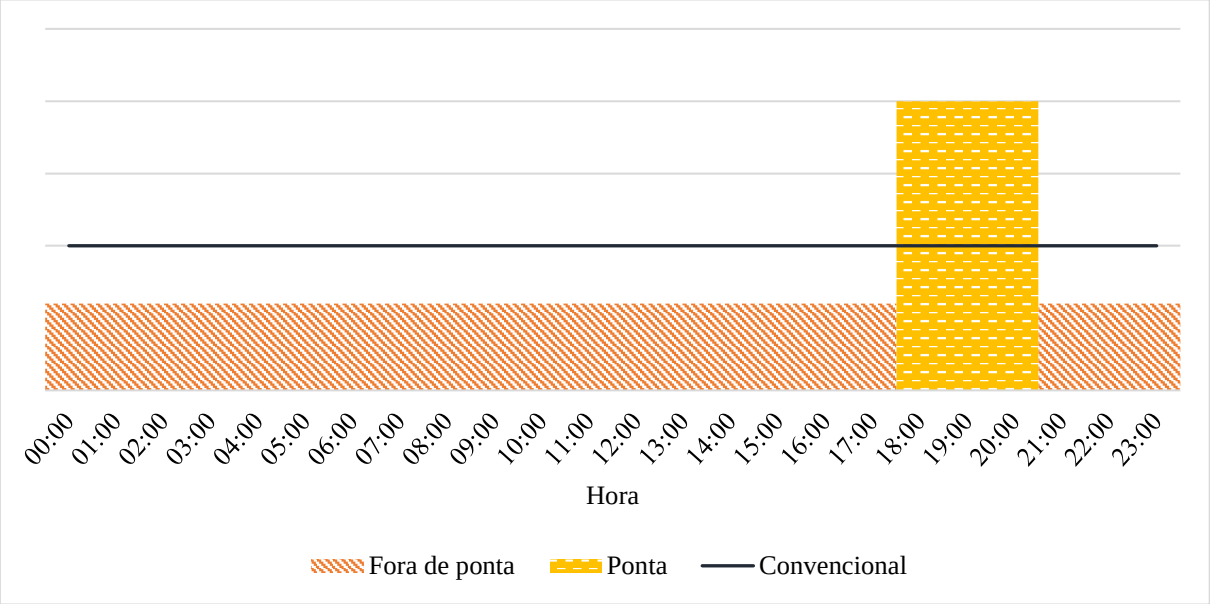


Fonte: Adaptado de ANEEL (2010).

As Figuras 20 à 22 apresentam os modelos de tarifa horária para o grupo A. A diferença neste grupo tarifário é a cobrança da demanda de potência ativa contratada, onde a forma de cobrança dependerá da estrutura tarifária à qual a unidade encontra-se submetida. Vale

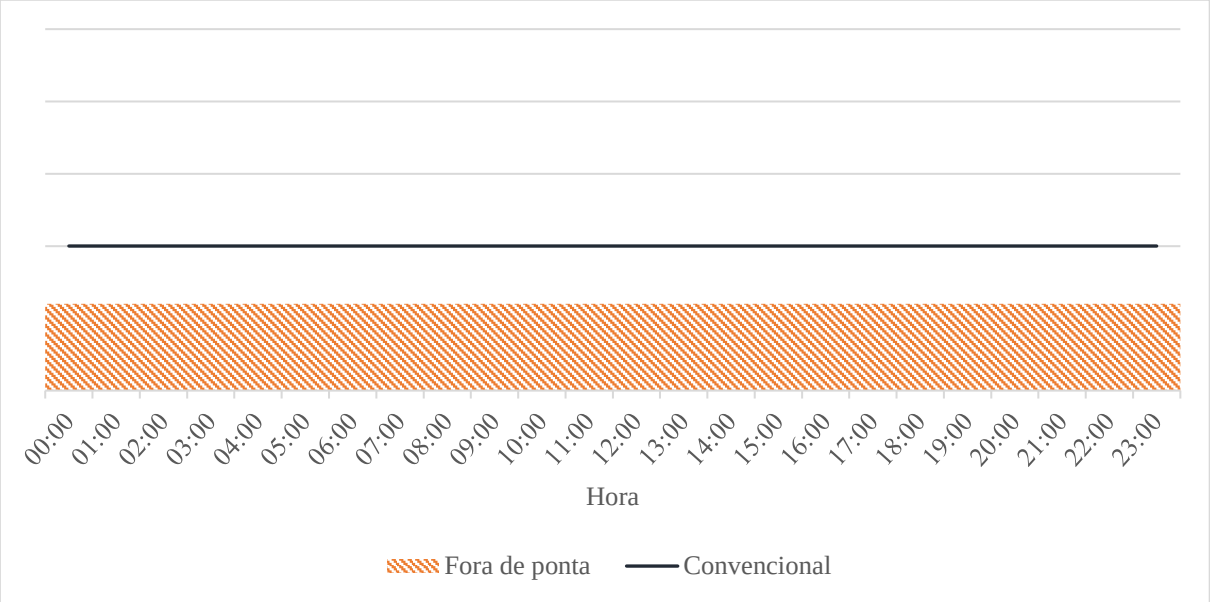
ressaltar que neste grupo tarifário existe a cobrança por violação dos níveis de potência reativa.

Figura 20 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo A (dias úteis)



Fonte: Adaptado de ANEEL (2010).

Figura 21 – Modelo de tarifa horária aplicada ao grupo A (sábados, domingos e feriados)



Fonte: Adaptado de ANEEL (2010).

Além dos horários apresentados, existe um horário especial, aplicado às unidades consumidoras da subclasse rural irrigante ou de aquicultura. O horário especial é o período de

8 horas e 30 minutos do dia, que abrange toda a madrugada, em que a carga destinada à irrigação ou à aquicultura recebe um desconto na tarifa de acordo com a região em que se localiza e o grupo tarifário a que pertence (ANEEL, 2010).

3.1.3 Estrutura tarifária

Conforme apresentado em seções anteriores sabe-se que as unidades podem escolher a estrutura tarifária à qual será submetida.

No grupo B as estruturas disponíveis são as tarifas convencional e branca. Está última apresenta faturamento por posto horário. Em ambas apenas a potência ativa é faturada.

No grupo A a tarifa cobrada é constituída em três modalidades, classificadas como convencional, verde e azul. Nestas modalidades aparecem os componentes como a demanda de potência ativa contratada e a potência reativa demandada (ANEEL, 2010).

- **Convencional** - Caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia. Essa modalidade encontra-se em fase de extinção.

$$P_c = T_c \times C_m \tag{3}$$

$$P_d = T_d \times D_{cont} \tag{4}$$

$$P_{Ult} = T_{Ult} \times (D_m - D_{cont}) \tag{5}$$

- **Azul** - Caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

$$P_c = \left(T_{c,fp} \times C_{m,fp}\right) + \left(T_{c,p} \times C_{m,p}\right) \tag{6}$$

$$P_d = \left(T_{d,fp} \times D_{cont,fp}\right) + \left(T_{d,p} \times D_{cont,p}\right) \tag{7}$$

$$P_{Ult} = \left(T_{Ult,fp} \times (D_{m,fp} - D_{cont,fp})\right) + \left(T_{Ult,p} \times (D_{m,p} - D_{cont,p})\right) \tag{8}$$

- **Verde** - Caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência.

$$P_c = \left(T_{c,fp} \times C_{m,fp}\right) + \left(T_{c,p} \times C_{m,p}\right) \tag{9}$$

$$P_d = T_d \times D_{cont} \tag{10}$$

$$P_{Ult} = T_{Ult} \times (D_m - D_{cont}) \tag{11}$$

Para as equações de (3) à (13), as variáveis possuem os seguintes significados:

P_c - Valor tarifado para a potência ativa consumida;

T_c - Tarifa de consumo;

C_m - Consumo de potência ativa medido;

P_d - Valor tarifado referente a demanda de potência ativa contratada;

T_d - Tarifa de demanda;

D_{cont} - Demanda de potência ativa contratada;

P_{ult} - Valor tarifado para a potência ativa que ultrapassou a demanda contratada;

T_{ult} - Tarifa de ultrapassagem;

D_m - Demanda de potência ativa medida;

P_c - Valor tarifado para a potência ativa consumida.

Os índices *fp* e *p* incrementados às variáveis nas modalidades Azul e Verde, significam respectivamente fora de ponta e ponta.

- **Potência reativa** - Para todas as modalidades de tarifação de consumo e demanda de potência reativa, a fórmula de cálculo para cobrança do excedente de demanda de potência reativa da rede, utiliza as seguintes equações:

$$Q_{Exc} = \sum_{T=1}^{n} \left[C_m \times \left(\frac{FP_{ref}}{FP_T} - 1 \right) \right] \times T_{ref} \tag{12}$$

$$DQ_{Exc} = \left[\underset{T=1}{\overset{n}{MAX}} \left(D_m \times \frac{FP_{ref}}{FP_T} \right) - D_{cont} \right] \times T_{d,fp\ (Azul)} \tag{13}$$

Onde:

Q_{Exc} (kVAr) – valor da potência reativa demandada da rede;

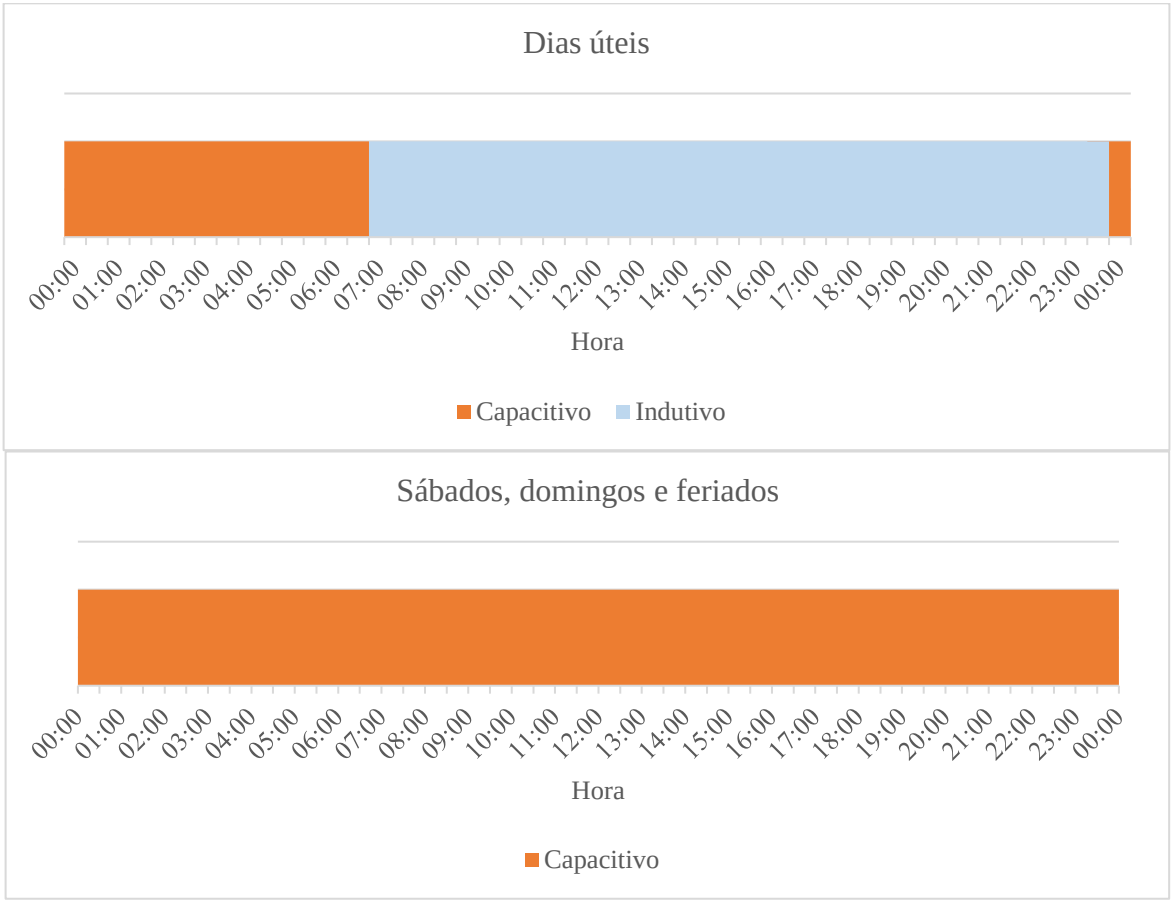
FP_T – fator de potência medido no período;

T_{ref} (R$) – tarifa bandeira verde do grupo B1 (residencial).

Para as unidades em análise o fator de potência de referência (FP_{ref}), indutivo ou capacitivo, possui o limite mínimo permitido de 0,92 (ANEEL, 2010). No ano de 2017, a tarifa média do grupo B1 foi de R$ 453,56 por MWh (EPE, 2018).

As cobranças por violação dos limites mínimos definidos para o fator de potência também levam em consideração o horário de operação. No período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h 30min e 6h 30min, apenas as violações de fator de potência capacitivo são faturadas. Nos demais horários apenas a violação de fator de potência indutivo é faturado, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Forma de faturamento por violação dos níveis de fator de potência.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2010).

3.1.4 Bandeiras tarifárias

A partir de 2015, em função das condições de geração de eletricidade, foi implantado o Sistema de Bandeiras Tarifárias. Tal sistema indica se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final. As bandeiras verde, amarela e vermelha indicam se haverá ou não acréscimo no valor cobrado pelo kWh consumido. As bandeiras estão assim definidas:

- Bandeira verde – condições favoráveis de geração de energia. Nesta bandeira a tarifa não sofre nenhum acréscimo;
- Bandeira amarela – condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R$ 0,015 para cada kWh consumido;
- Bandeira vermelha (Patamar 1) – condições mais onerosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R$ 0,040 para cada kWh consumido;

- Bandeira vermelha (Patamar 2) – condições ainda mais onerosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R$ 0,060 para cada kWh consumido.

3.2 TRIBUTAÇÃO

No sistema elétrico o imposto estadual sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS) é cobrado sobre o valor integral da energia consumida não levando em consideração a compensação de energia. Portanto a cobrança incidirá sobre a energia que a unidade consumidora produziu. Fato a considerar é que não ocorre transferência de titularidade da energia gerada, o que torna a incidência do imposto indevida.

Buscando suprir o entrave tributário, foi sancionada a Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015, que reduziu a zero as alíquotas da Contribuição para o PIS/Pasep e da Contribuição para Financiamento da Seguridade Social – COFINS que incidem sobre a energia injetada na rede (BRASIL, 2015). Neste sentido o Conselho de Política Fazendária autorizou os estados, através do convênio ICMS nº 16, 22 de abril de 2015, a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Logo, a cobrança incidiria sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada. Contudo, essa autorização aplica-se somente à compensação de energia elétrica produzida por micro geração e mini geração definidas na referida resolução, cuja potência instalada seja, respectivamente, menor ou igual a 75 kW e superior a 75 kW e menor ou igual a 1 MW e não se aplica ao custo de disponibilidade, à energia reativa, à demanda de potência, aos encargos de conexão ou uso do sistema de distribuição, e a quaisquer outros valores cobrados pela distribuidora (CONFAZ, 2015).

4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Os estudos em GDFV, quase sempre são realizados considerando que 100% da energia injetada na rede é utilizada no sistema de compensação. Esse tipo de estudo é bem satisfatório. Contudo, os resultados referentes à taxa de retorno do investimento não será o mesmo para todas as unidades.

4.1 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO

O sistema de compensação é o procedimento no qual a potência ativa excedente, produzida pelo sistema de GD, é injetada no sistema de distribuição, passando a unidade consumidora a acumular créditos em quantidade de potência ativa. Para todas as unidades a energia excedente poderá ser utilizada para compensação por um prazo de 60 meses. Tais créditos poderão ser utilizados para abater o consumo da unidade onde a energia foi gerada ou em outra unidade consumidora. A classificação dos empreendimentos foi realizada por Aneel (2015), conforme segue:

- **Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras**: unidades consumidoras localizadas em uma mesma propriedade ou condomínio, com porcentagens de compensação definidas pelos próprios consumidores;
- **Sistema geração compartilhada**: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica;
- **Autoconsumo remoto**: para unidades consumidoras que estejam sob o mesmo cadastro de pessoa física ou cadastro de pessoa jurídica, com sistema de GD em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Para unidades onde apenas o consumo de potência ativa (Grupo B) é faturado, toda potência ativa injetada na rede é compensada sem qualquer restrição ou fator de cálculo. Contudo existem unidades que se enquadraram no modo de cobrança da tarifa branca, onde existe variação de custo horo-sazonal. Neste último a compensação de potência deve, prioritariamente, ser realizada na faixa horária em que foi gerada, sendo possível utilizar o excedente desde que aplicado um fator de cálculo. Essas unidades devem arcar com a taxa de disponibilidade do sistema, que será equivalente à de 30kWh para instalações monofásicas, 50kWh para instalações bifásicas e 100kWh para instalações trifásicas. Esses valores serão os

valores mínimos a serem pagos por mês, mesmo que a potência ativa injetada na rede ultrapasse o consumo no mesmo período.

Em um outro grupo de consumidores (Grupo A), são faturados o consumo de potência ativa, a demanda de potência ativa (demanda contratada) e a demanda de potência reativa. Esse tipo de faturamento altera a forma de análise no que diz respeito à taxa de retorno do investimento, e limitações na potência instalada.

A compensação de potência ativa deve ocorrer, prioritariamente, dentro da faixa horária em que a energia foi injetada na rede, isso devido à existência de tarifas horo-sazonais (ponta e fora-ponta). A compensação em horário diferente ao da geração é permitido desde que seja utilizado um fator de cálculo. De forma similar, esse tipo de unidade deve, também, arcar com a taxa de disponibilidade do sistema que será o valor correspondente à demanda contratada.

4.2 LIMITAÇÕES DE INSTALAÇÃO E COMPARATIVO ENTRE UNIDADES

Para micro geração e mini geração distribuída, a resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu que a potência instalada fica limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora onde a GDFV será conectada. Em unidades onde apenas a potência ativa é faturada, a potência disponibilizada será a resultante da multiplicação da capacidade nominal de condução de corrente elétrica do dispositivo de proteção geral da unidade consumidora pela tensão nominal. Para as unidades onde considera-se como potência disponibilizada a demanda contratada, esta demanda será o limite máximo para a instalação da GDFV (ANEEL, 2012).

Como forma de exemplificar a situação apresentada foi realizado o cálculo de faturamento de potência ativa, considerando 2 casos distintos e comparando os resultados para unidades do grupo A e B.

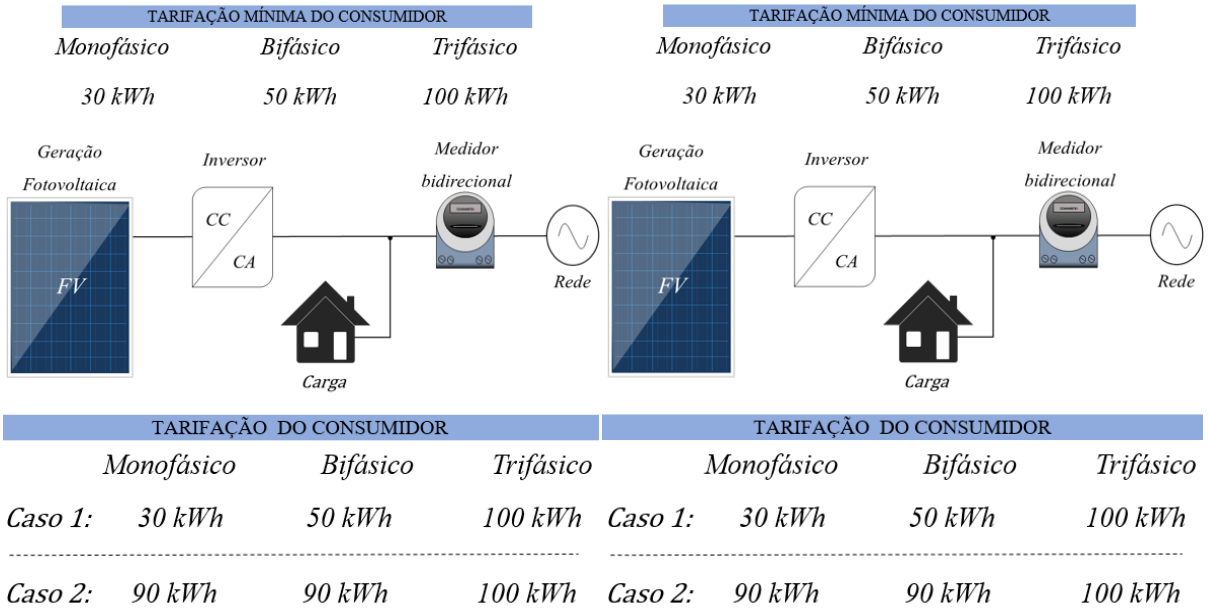
A Figura 23 apresenta o comportamento nas diferentes unidades consumidoras tomando por base as situações 1 e 2. A Tabela 3 apresenta os dados que serão considerados no exemplo.

Tabela 3 – Resultados mensais de uma unidade com GDFV.

	Geração no mês	Consumo no mês	Saldo
Caso 1	600 kWh	520 kWh	+80 kWh
Caso 2	430 kWh	520 kWh	-90 kWh

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 – Comparativo entre unidades.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nesse exemplo ilustrativo apresentado na Figura 23, é possível verificar que todas as unidades devem arcar com os custos de disponibilidade do sistema, mesmo quando a GDFV supra totalmente a demanda de consumo. A diferença entre o grupo A e B dá-se pelos motivos já expostos neste capítulo. Não se pode esquecer que nas unidades do grupo A existe cobrança por violação dos limites de demanda de potência reativa, conforme exposto no item 2.4. A inserção de uma GDFV altera os níveis do fator de potência da unidade, o que poderá causar cobrança por violação de demanda de potência reativa.

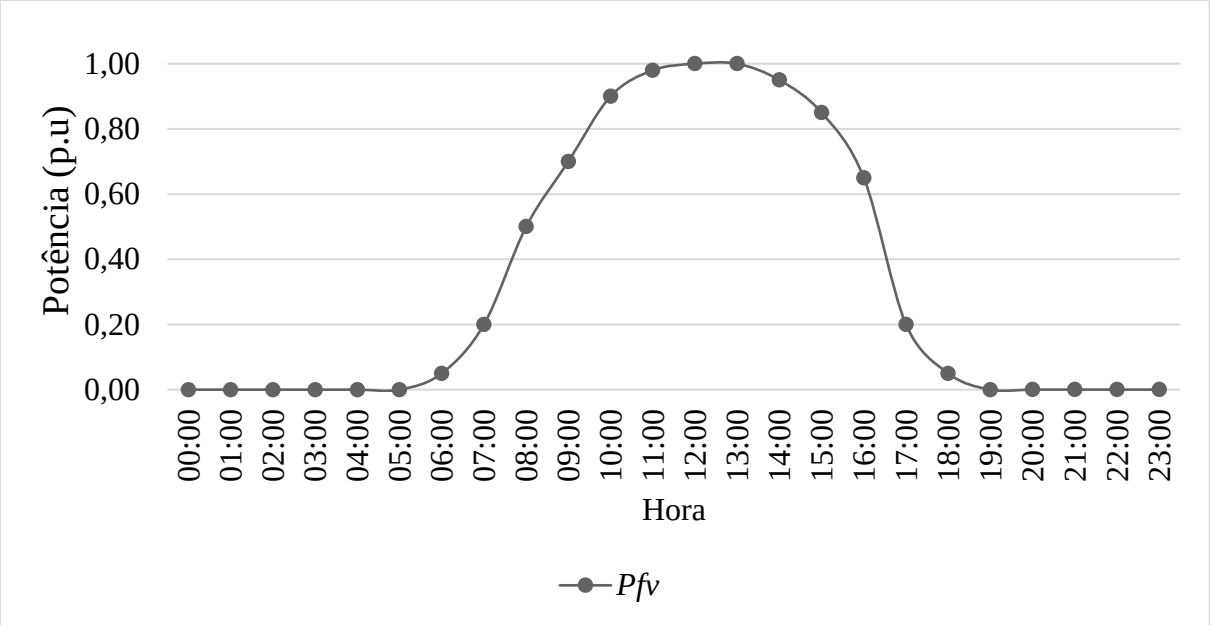
4.3 PERFIS DE GERAÇÃO E CARGAS

Os perfis de cargas fictícios e o perfil de geração fotovoltaica são apresentados. As curvas de comportamento foram obtidas através da inserção das equações apresentadas nos itens 2.4 e 3.1 em programa computacional (planilha eletrônica) desenvolvido pelo autor e aplicadas utilizando-se os dados típicos de funcionamento.

4.3.1 Perfil de geração fotovoltaica

O perfil de geração fotovoltaica típico é apresentado na Figura 24 e leva em consideração que existe geração no período de 6h às 18h, com geração máxima por volta do meio dia (EPE, 2018), sendo *Pfv* a potência ativa proveniente da geração fotovoltaica diária.

Figura 24 – Perfil típico de geração fotovoltaica.



Fonte: Adaptado (EPE, 2018).

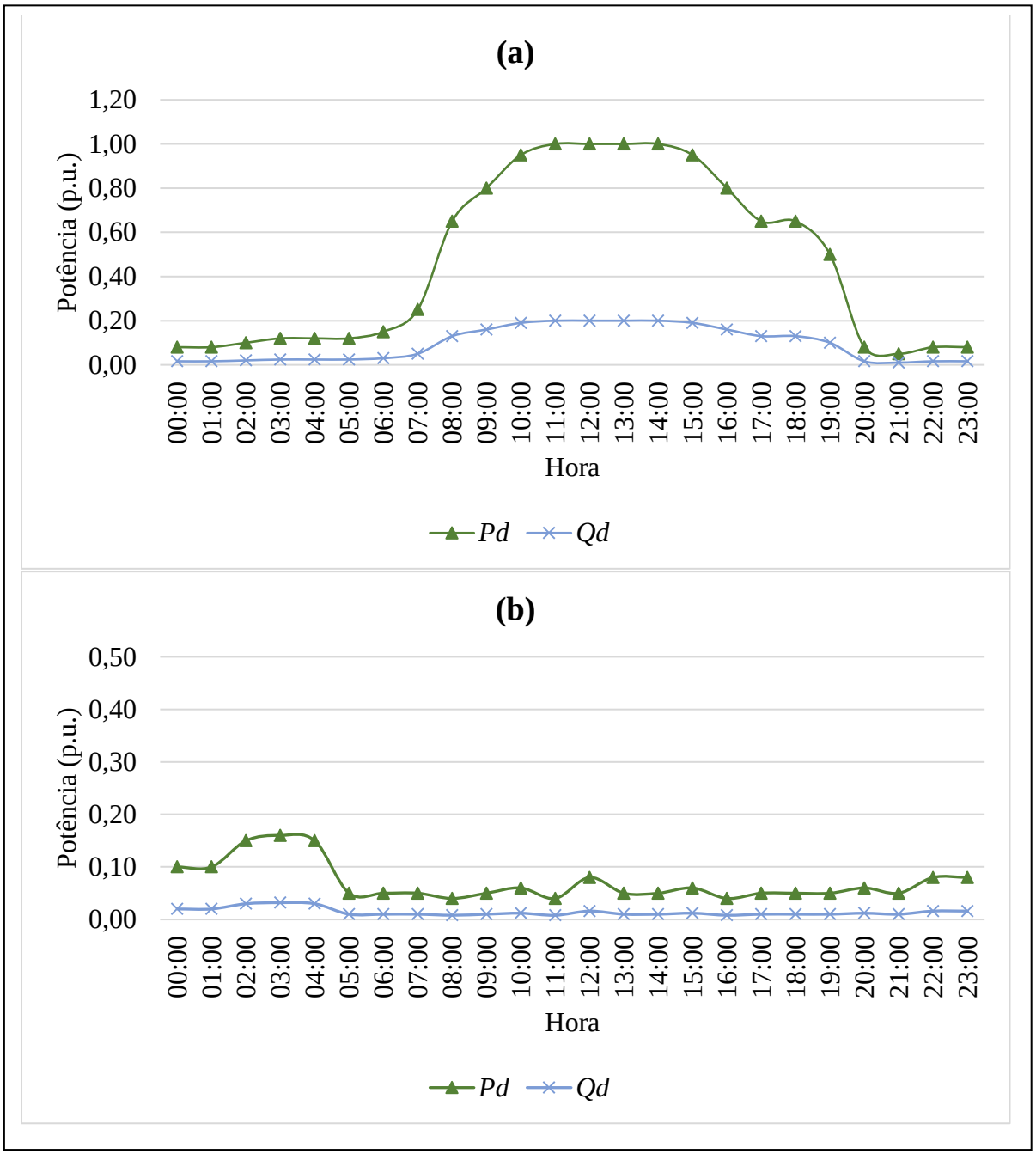
4.3.2 Perfis de cargas

Serão definidos os perfis de cargas fictícios a serem analisados. Foi considerado que todas as cargas possuem sistema de compensação de potência reativa, que mantem o fator de potência com valor superior a 0,98. São apresentadas as curvas *Pd* de potência ativa e *Qd(carga)* de potência reativa demandas pelas cargas.

- **Perfil 1**

A Figura 25-(a) apresenta o primeiro perfil de carga definido. Este considera uma unidade com funcionamento diurno sem intervalo como por exemplo um órgão público ou um pequeno comércio. A Figura 25-(b) ilustra o funcionamento em dias onde não há atendimento, como por exemplo finais de semana e/ou feriados.

Figura 25 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 1.

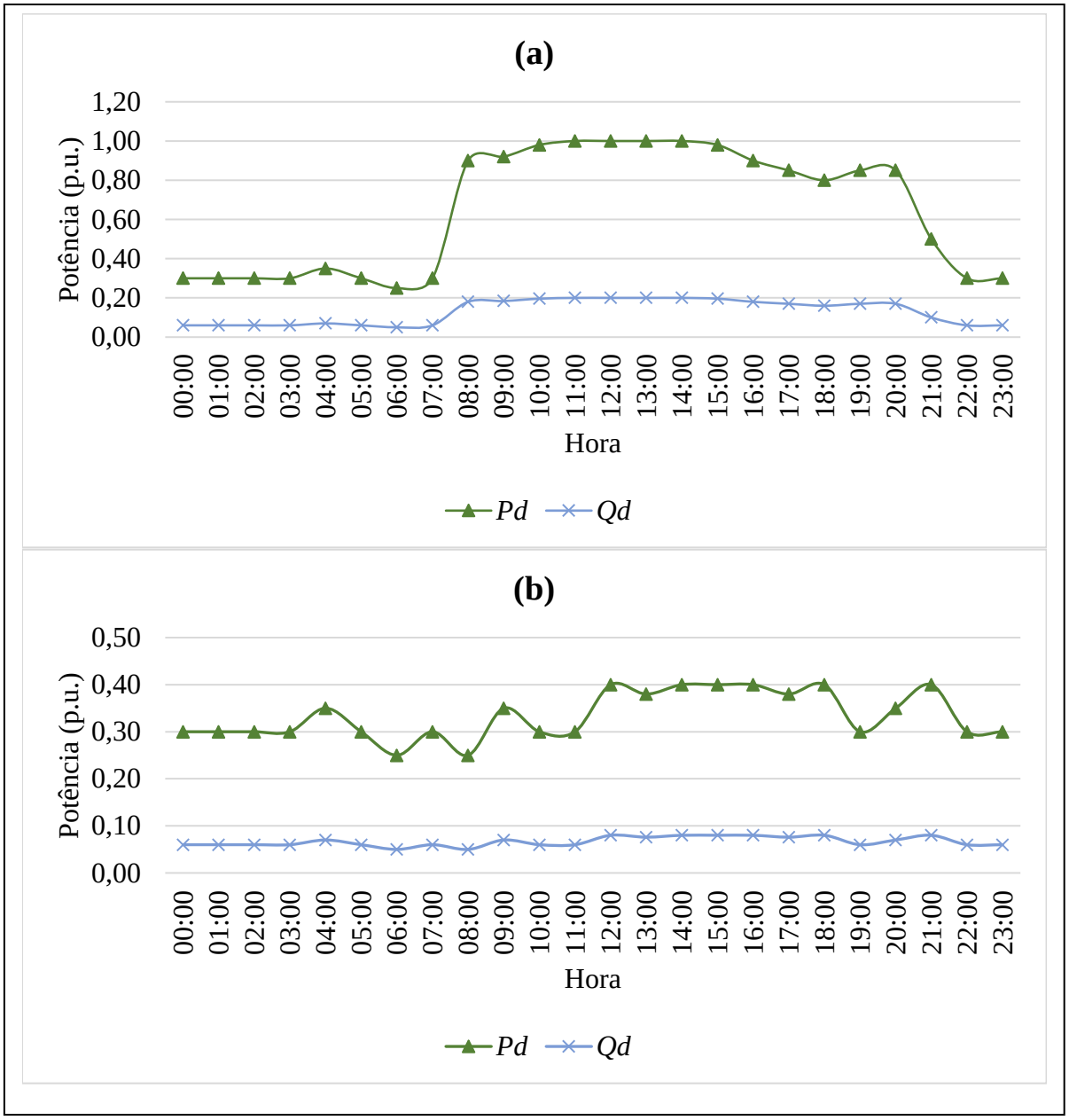


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

- **Perfil 2**

A Figura 26-(a) apresenta o perfil de carga definido considerando uma unidade com funcionamento diurno sem intervalo, onde existe demanda em períodos noturnos e madrugada, como por exemplo um supermercado, onde há necessidade de funcionamento de equipamento de refrigeração mesmo quando não existe atendimento ao público e Figura 26-(b) ilustra o perfil de carga em dias onde não há atendimento, como por exemplo finais de semana e/ou feriados.

Figura 26 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 2.

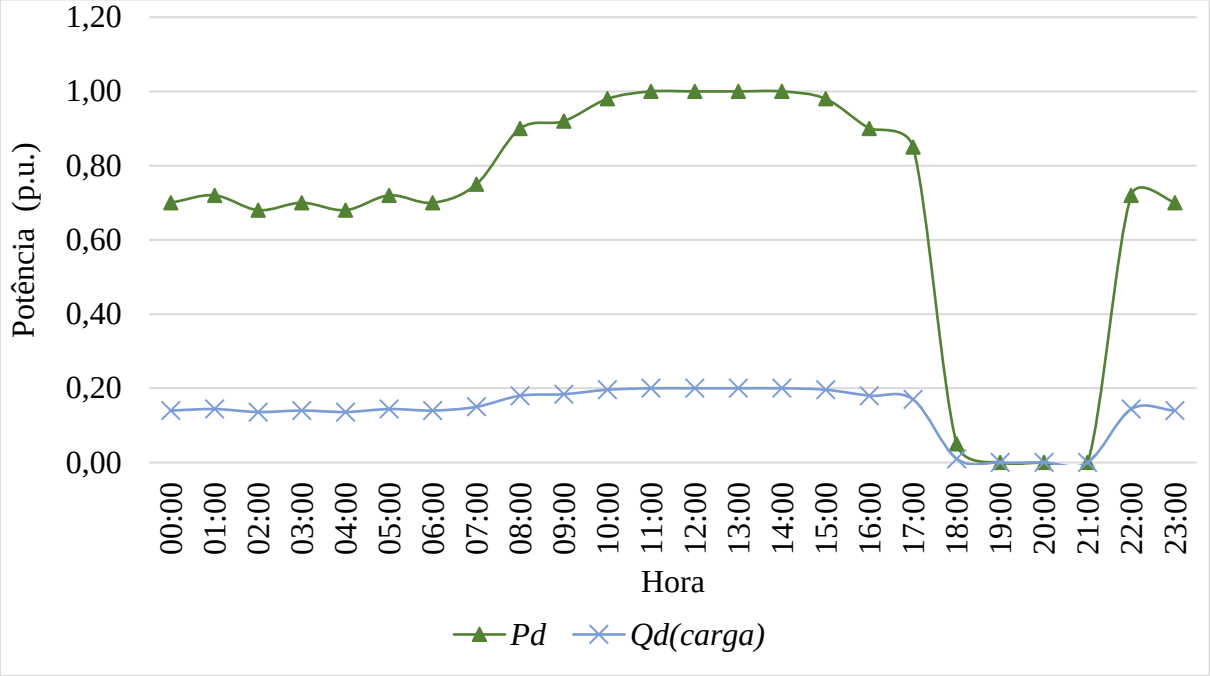


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

- **Perfil 3**

A Figura 27 apresenta o perfil de carga definido considerando uma unidade onde existe demanda ao longo do dia exceto no horário de ponta, como por exemplo uma indústria que opte por não funcionar no período de ponta ou mesmo que opte por outro tipo de geração própria.

Figura 27 – Perfil de carga de unidade consumidora fictícia 3.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 ANÁLISE DOS MODOS DE OPERAÇÃO

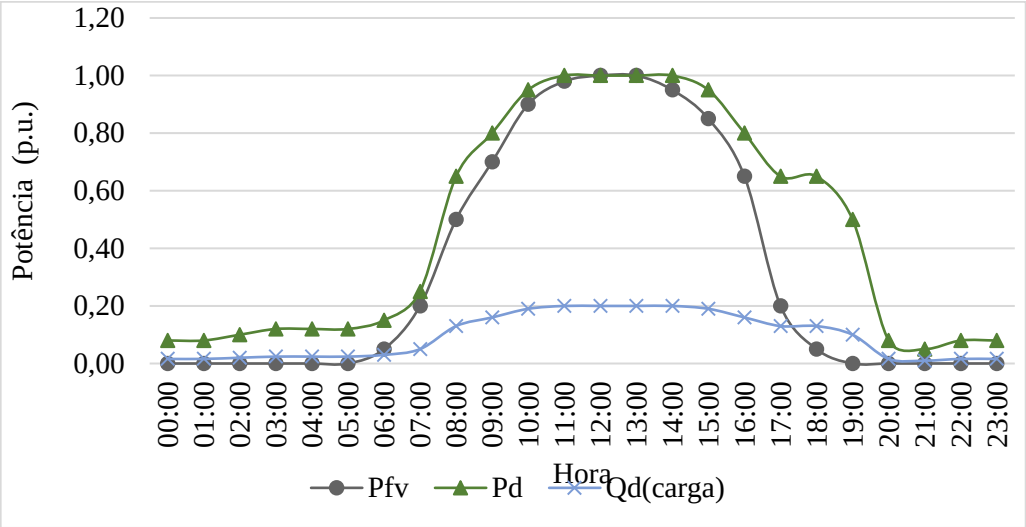
Neste item serão realizadas projeções de funcionamento ao longo do dia de unidades consumidoras fictícias com geração distribuída instalada. Para todos os casos será considerada a configuração com medidor bidirecional ou de quatro quadrantes e o perfil de geração ilustrado na Figura 24.

4.4.1 Modo de Operação 1

Considerando que o gerador fornece apenas potência ativa na unidade com perfil apresentado na Figura 25-(a), obteve-se as curvas ilustradas nas Figuras 28, 29, 30 e 31, sendo, *FPm* o fator de potência visto pelo sistema de medição, *FPfv* o fator de potência da

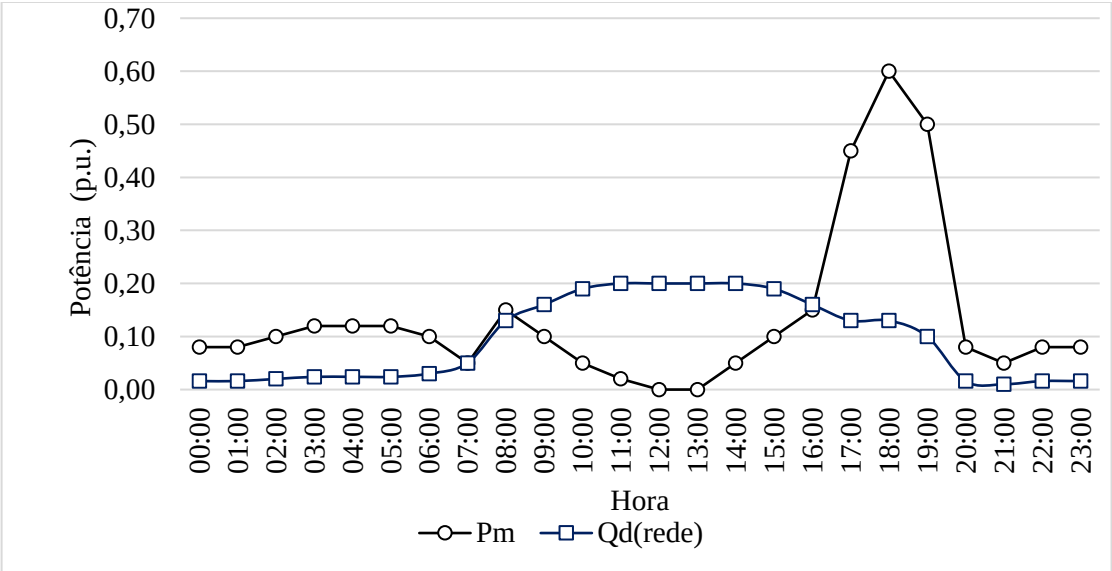
GD, *Pm* a potência ativa medida ou faturada, *Qd(rede)* a potência reativa demandada da rede e *Qfatura* a potência reativa medida ou faturada.

Figura 28 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 29 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais).

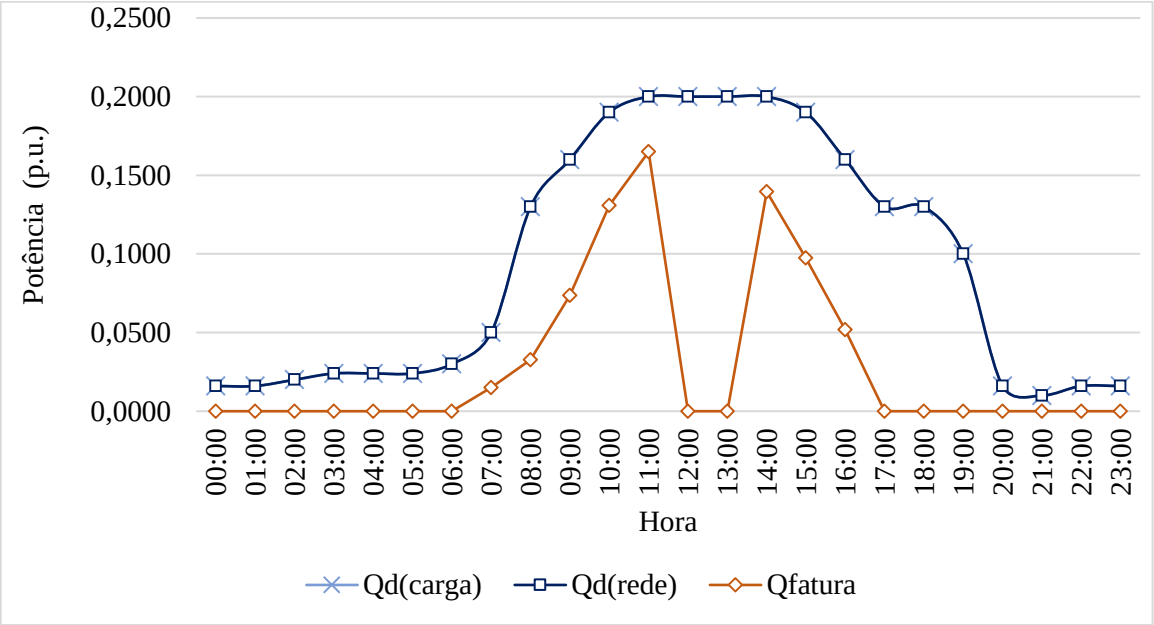


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 28 é apresentado o modo de operação da unidade 1 em concomitância com a GDFV em um dia típico de funcionamento. Na Figura 29 é possível verificar que ocorre uma redução da potência ativa medida/faturada no período de geração fotovoltaica, ao passo que a potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme é

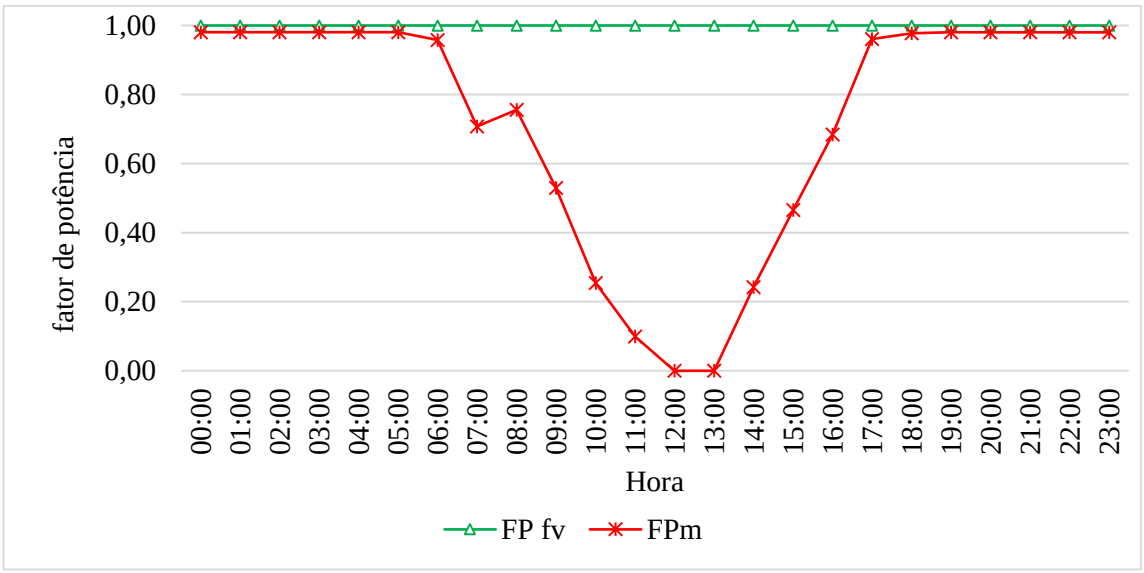
possível verificar ao comparar as Figuras 28**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 29.

Figura 30 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência reativa (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 31 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

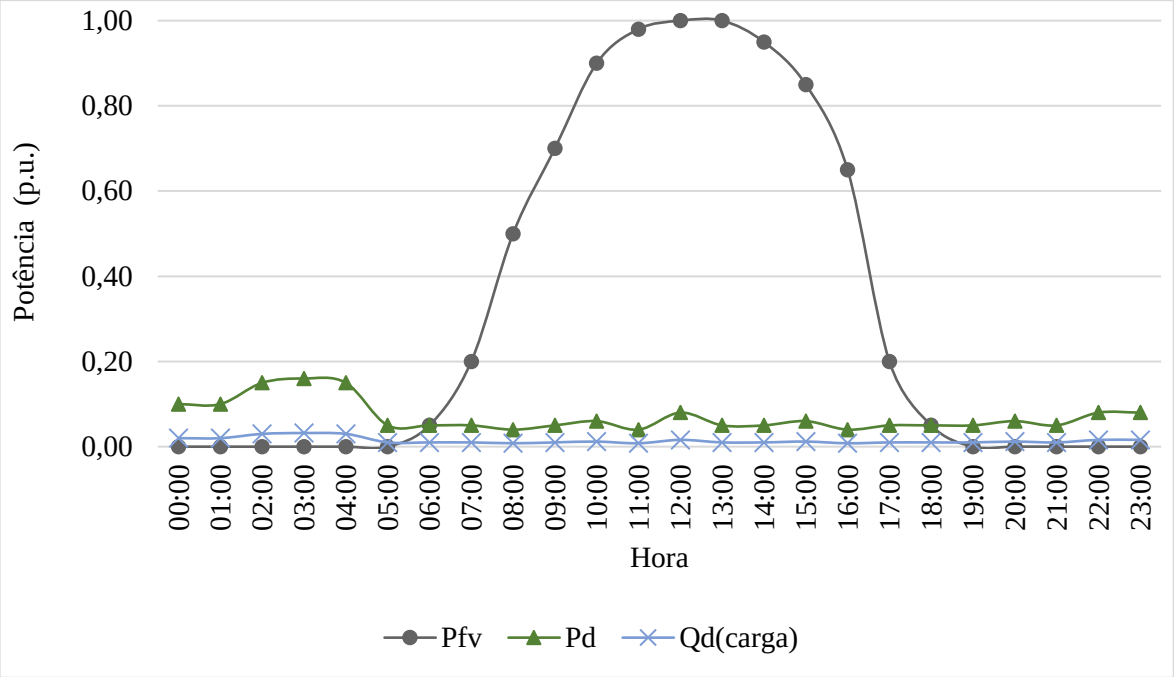
Verifica-se que, à medida que GD vai suprindo a demanda de potência ativa ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição, conforme pode ser observado na Figura 31. Com relação ao fator de potência que é um dos determinantes para o

faturamento da potência reativa, contudo, como pode ser visto na Figura 30, isso não ocorre ao longo de todo o período analisado, uma vez que tal medida depende da potência ativa medida, que possui valores atenuados pela GD. Neste caso o sistema de geração supre 71% da energia ativa demandada pela carga.

Vale ressaltar que existe cobranças de potência e demanda de potência reativa em alguns períodos do dia. Para que não ocorra cobrança por violação dos limites, o consumidor deverá utilizar um sistema que supra toda a demanda de potência reativa, o que ocasionará uma elevação no custo de instalação da planta GDFV, interferindo também na taxa de retorno do investimento.

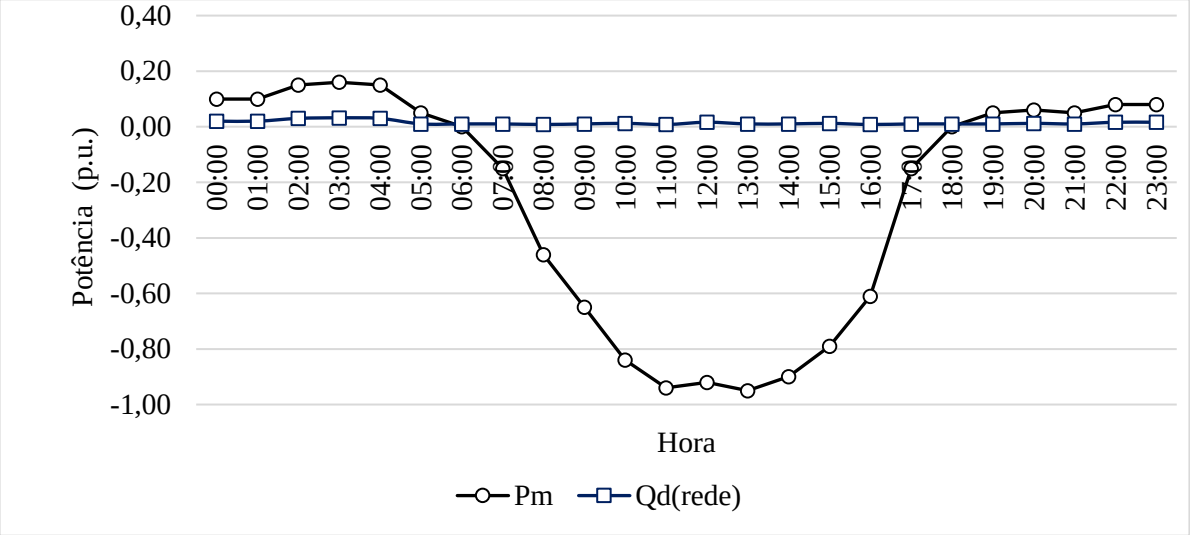
Considerando, que o gerador fornece apenas potência ativa, na unidade com perfil apresentado na Figura 25-(b), obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 32, 33, 34 e 35. A Figura 32 ilustra o modo de operação da unidade 2 em concomitância com a GDFV nos finais de semana e/ou feriados.

Figura 32 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

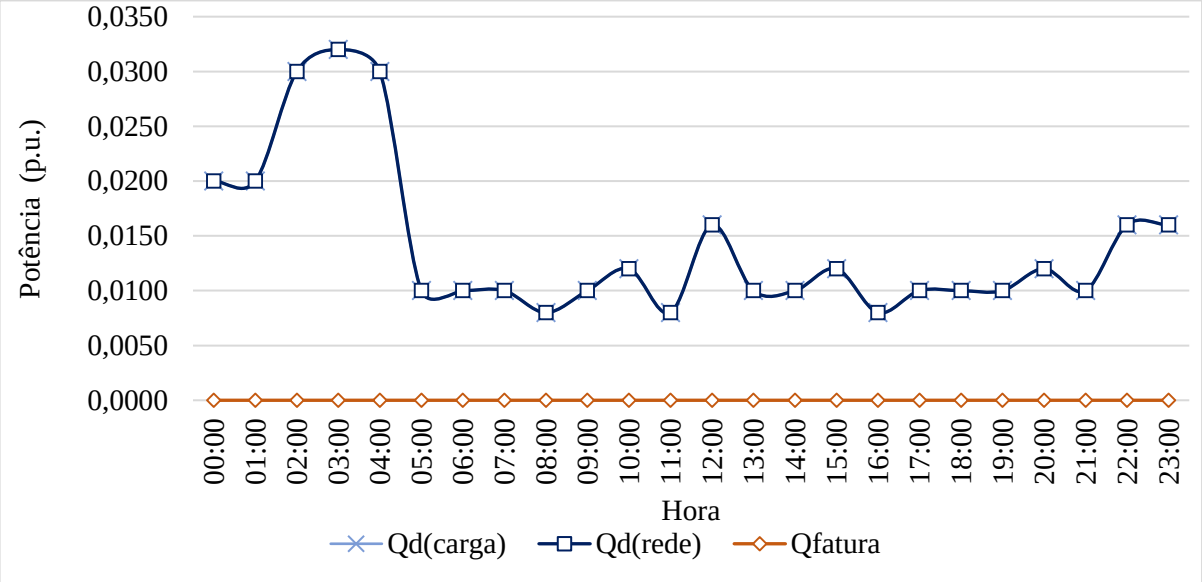
Figura 33 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

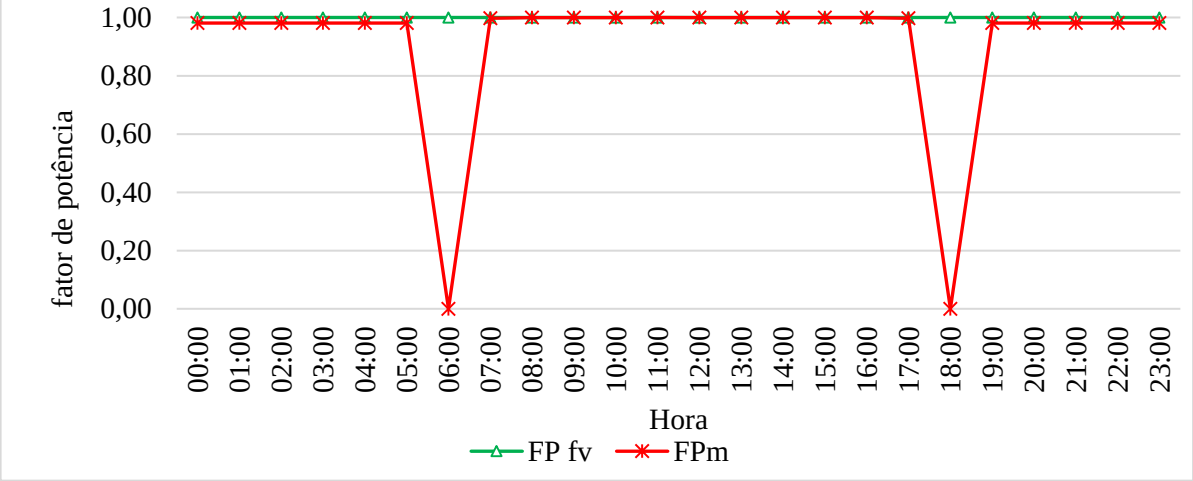
Na Figura 33 é possível verificar que ocorre uma redução da potência ativa medida/faturada e no período entre as 06h e as 18h ocorre injeção de potência ativa na rede. Do mesmo modo que ocorre em dias normais, a potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 32 e Figura 33. Na Figura 34 sáo apresentadas as curvas de potência reativa.

Figura 34 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1– Potência reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 35 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 - Fator de potência (finais de semana e feriados).



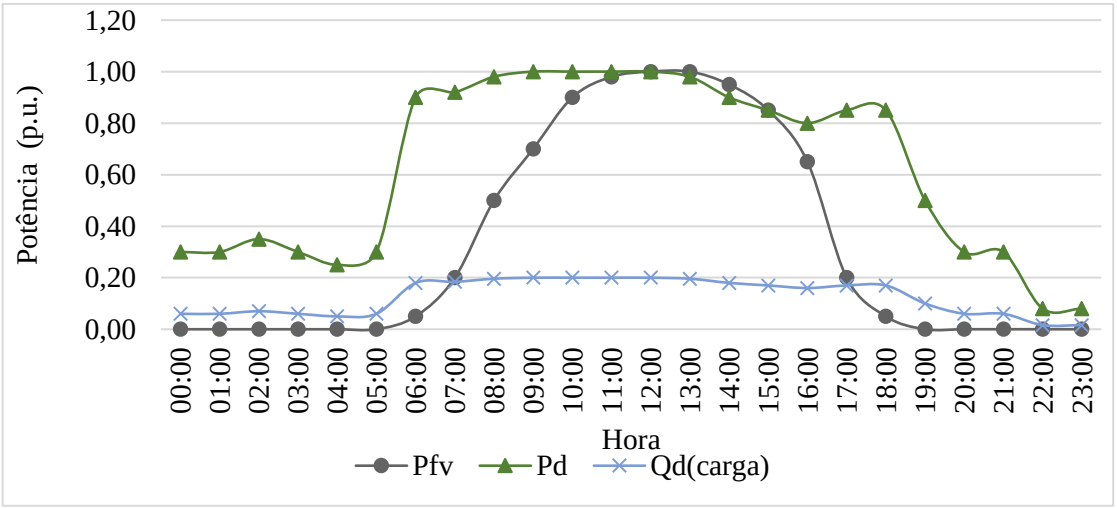
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No ponto de intersecção verifica-se que o ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição, exceto no período de fluxo reverso, conforme pode ser observado na Figura 35. Contudo não existe faturamento da potência reativa, como pode ser visto na Figura 34.

4.4.2 Modo de Operação 2

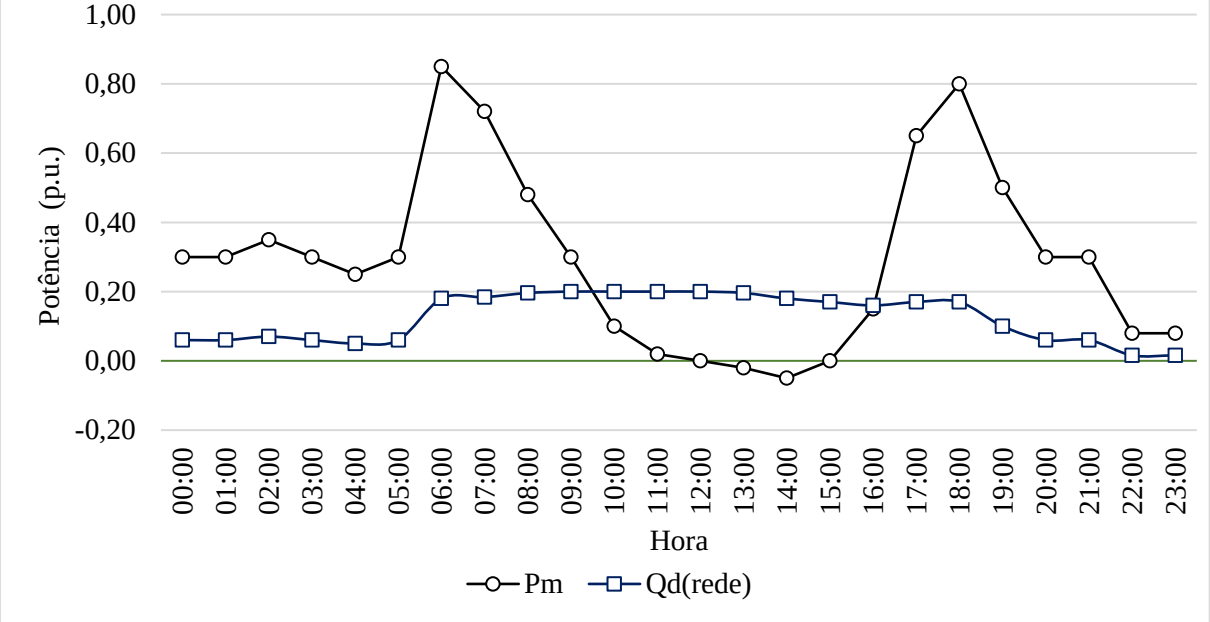
Considerando, que o gerador fornece apenas potência ativa, na unidade com perfil apresentado na Figura 26-(a) obteve-se as curvas ilustradas nas Figuras 36, 37, 38 e 39.

Figura 36 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais).



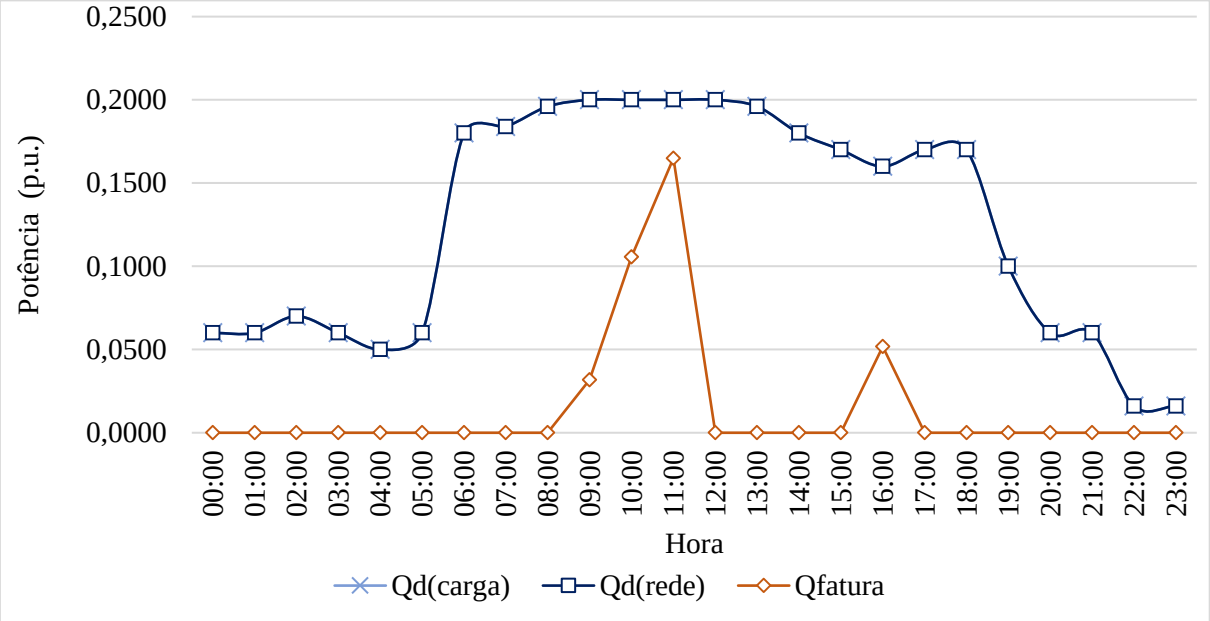
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 37 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 38 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (dias normais).

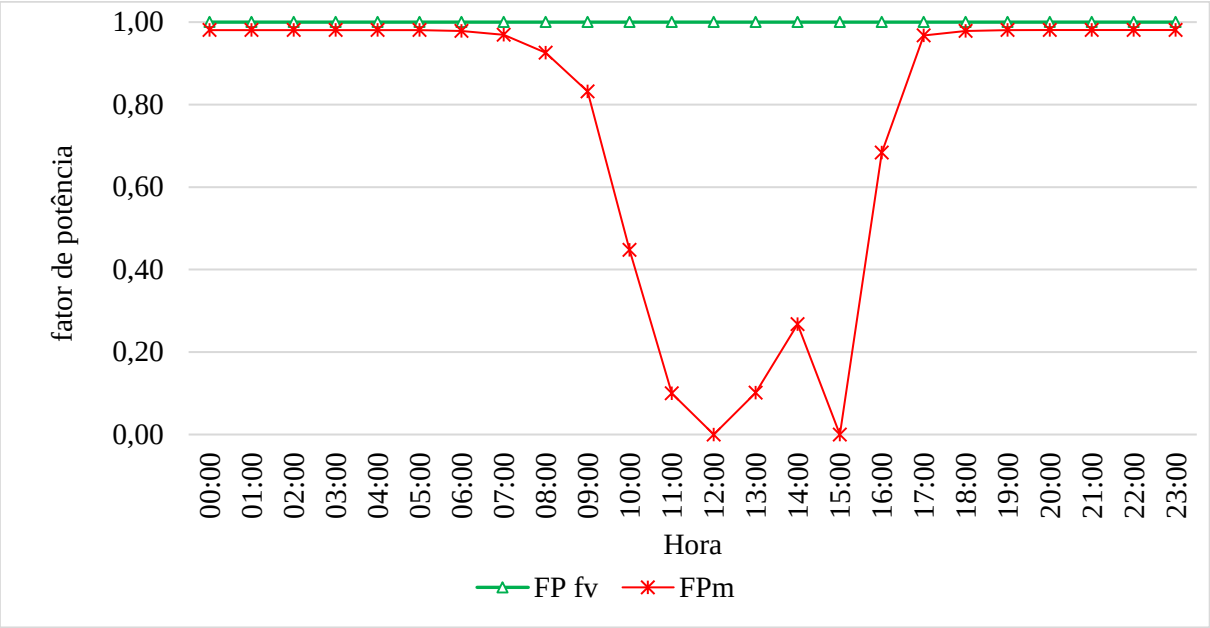


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 36 ilustra o modo de operação da unidade 1 em concomitância com a GDFV em um dia típico de funcionamento. Na Figura 37 é possível verificar que ocorre uma redução da potência ativa medida/faturada no período de geração fotovoltaica, ao passo que a potência

reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 36 e 37.

Figura 39 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Fator de potência (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

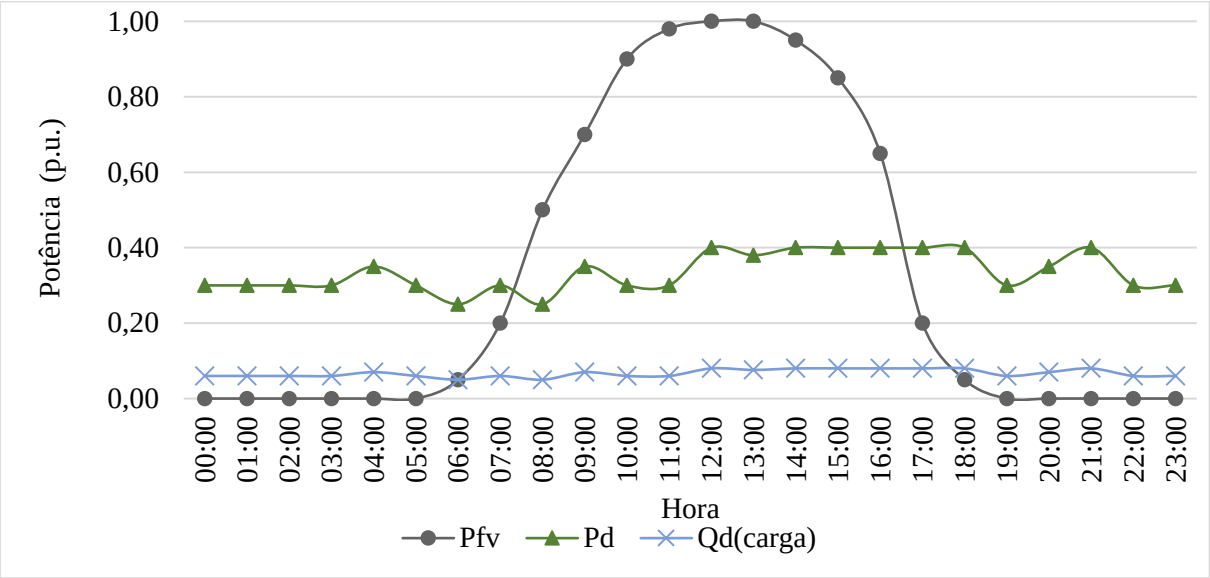
À medida que a GD vai suprindo a demanda de potência ativa ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição, conforme pode ser observado na Figura 39. Como fator de potência é um dos determinantes para o faturamento da potência reativa, onde a curva do seu comportamento pode ser visto na Figura 38, isso não ocorre ao longo de todo o período em que o nível do *FPm* encontra-se abaixo do valor de referência. Isso deve-se à forma de cálculo do faturamento da potência reativa apresentadas em (12) e (13). O sistema de geração supre apenas 53% da potência ativa demandada pela carga.

Ressalta-se que existe cobranças de potência e demanda de potência reativa em alguns períodos do dia. Para que não ocorra cobrança por violação dos limites, o consumidor deverá utilizar um sistema que supra toda a demanda de potência reativa, o que ocasionará uma elevação no custo de instalação da planta FV, interferindo também na taxa de retorno do investimento.

Considerando que o gerador fornece apenas potência ativa na unidade com perfil apresentado na Figura 26-(b), obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 40, 41, 42 e 43.

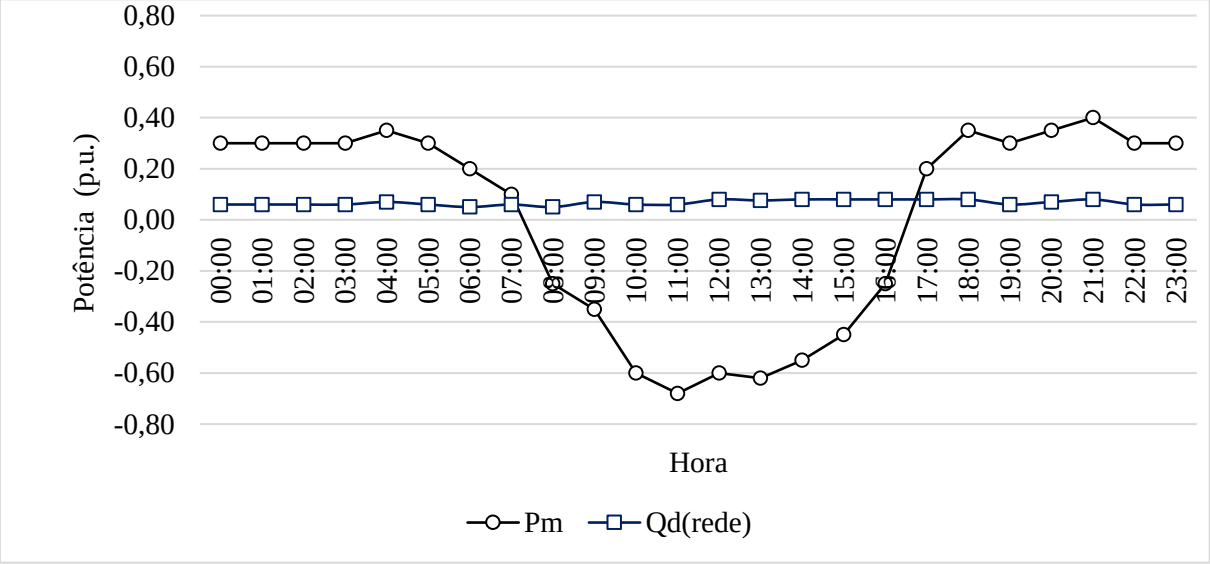
Na Figura 40 apresenta-se o modo de operação da unidade 2 em concomitância com a GDFV nos finais de semana e/ou feriados.

Figura 40 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

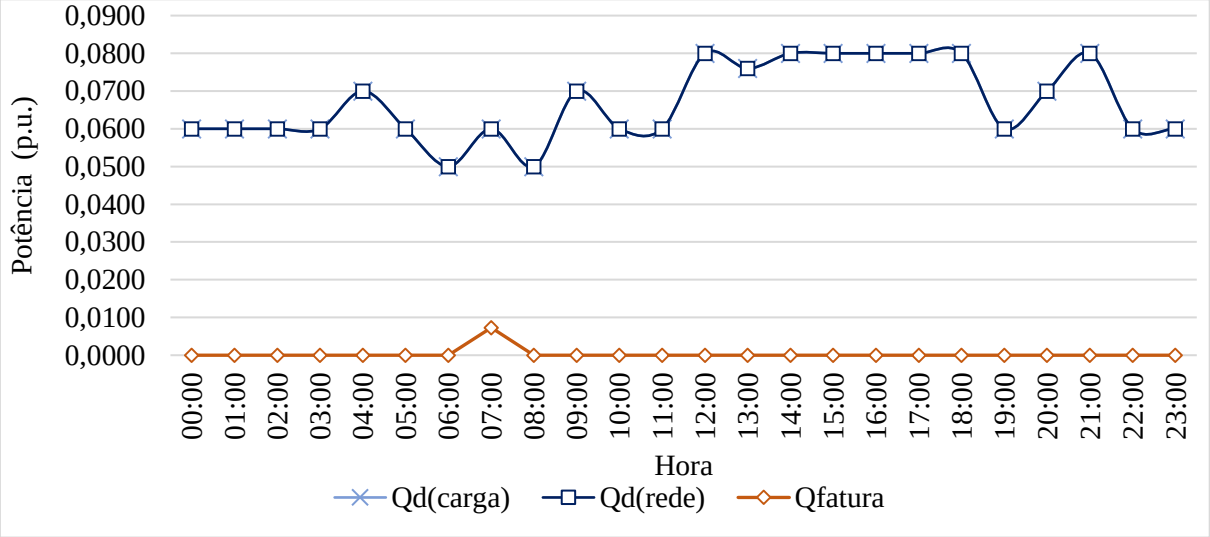
Figura 41 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

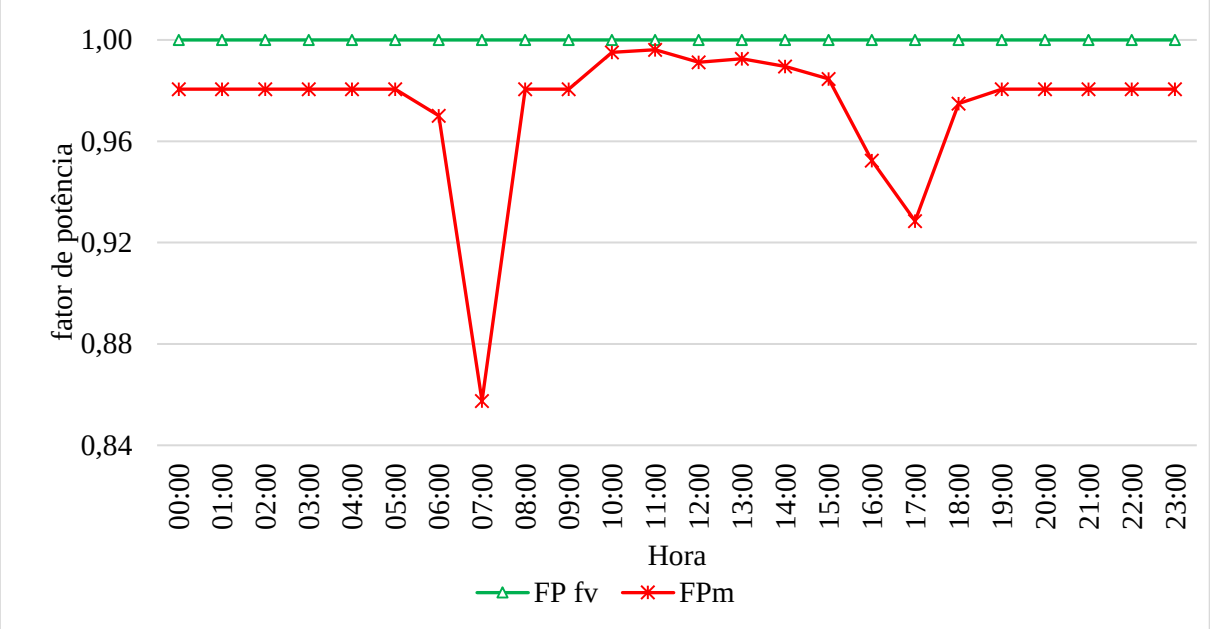
Na Figura 41 é possível verificar que ocorre uma redução da potência ativa medida/faturada e no período entre 7:10h e 16:50h ocorre injeção de potência ativa na rede, do mesmo modo que ocorre em dia normais. A potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 40 e 41.

Figura 42 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 43 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 - Fator de potência (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em se tratando de potência ativa, neste caso a potência gerada supre a potência consumida, logo, para o comportamento em questão não existe faturamento de potência ativa.

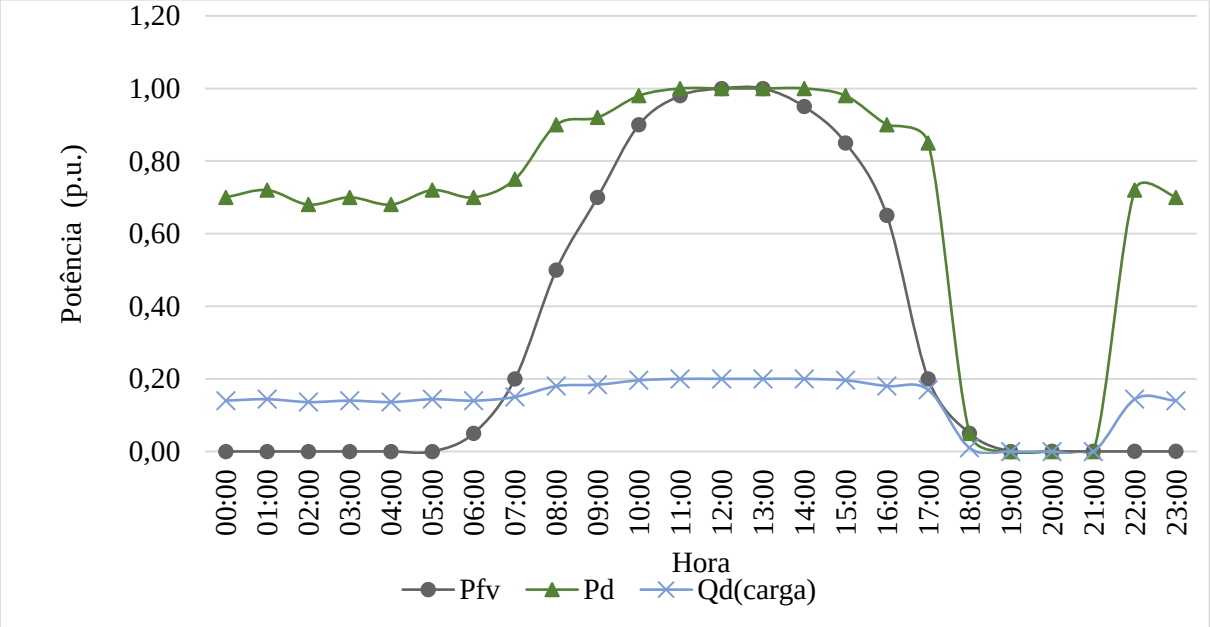
Verifica-se que, à medida que a GD vai suprindo a demanda de potência ativa ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição exceto no período de fluxo reverso, conforme pode ser observado na Figura 43.

Com relação ao fator de potência, que é um dos determinantes para o faturamento da potência reativa, como pode ser visto na Figura 42, mesmo em dias de baixa demanda e de injeção de potência ativa na rede, pode ocorrer cobrança de potência e demanda de potência reativa em alguns períodos do dia. Sendo necessária a utilização de um sistema de compensação de demanda de potência reativa, o que na maioria dos casos a unidade deve possuir, uma vez que os níveis de demanda é pequena. Logo, esse efeito não deve causar uma elevação no custo de instalação da planta FV.

4.4.3 Modo de Operação 3

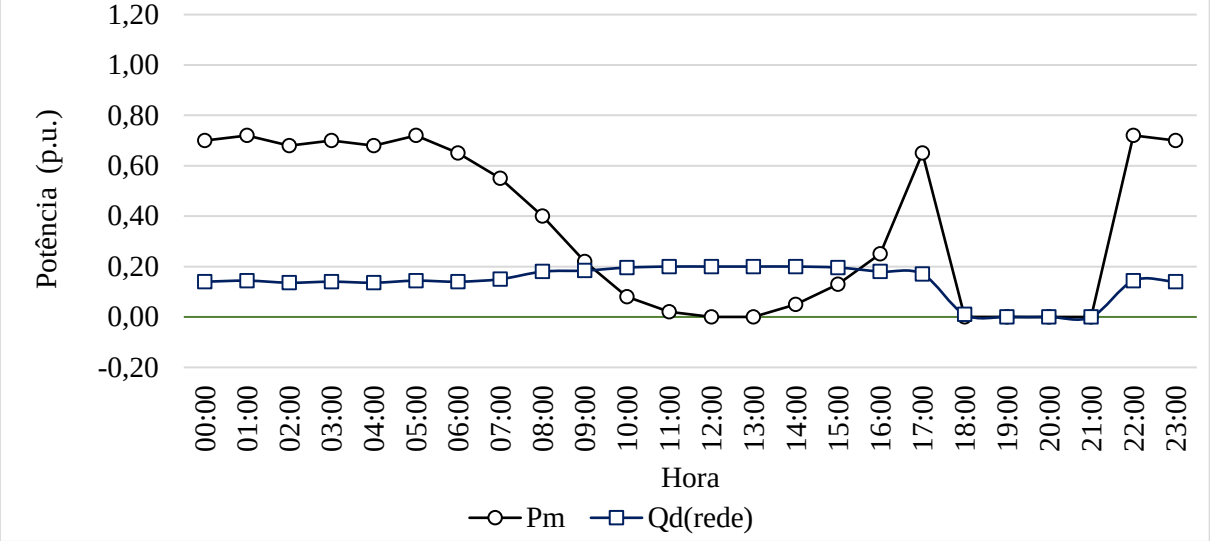
Considerando que o gerador fornece apenas potência ativa na unidade com perfil apresentado na Figura 27, obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 44, 45, 46 e 47. Na Figura 44 apresenta-se o modo de operação da unidade 3 em concomitância com a GDFV em um dia típico de funcionamento.

Figura 44 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Geração FV e Potência demandada pela carga.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

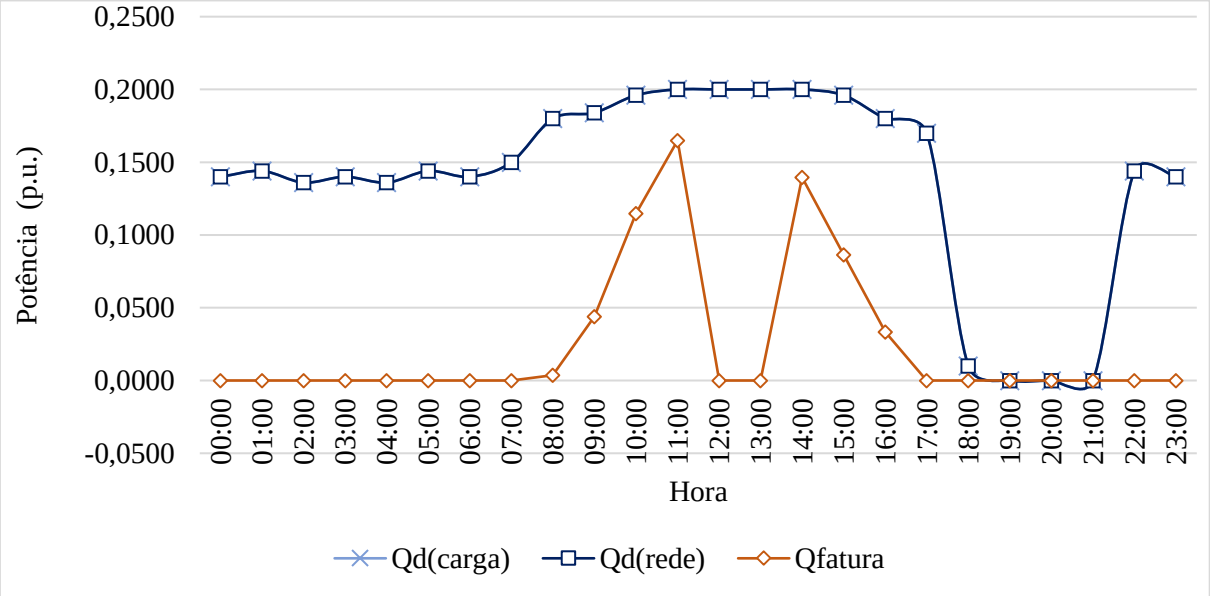
Figura 45 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Potência ativa medida e demanda reativa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

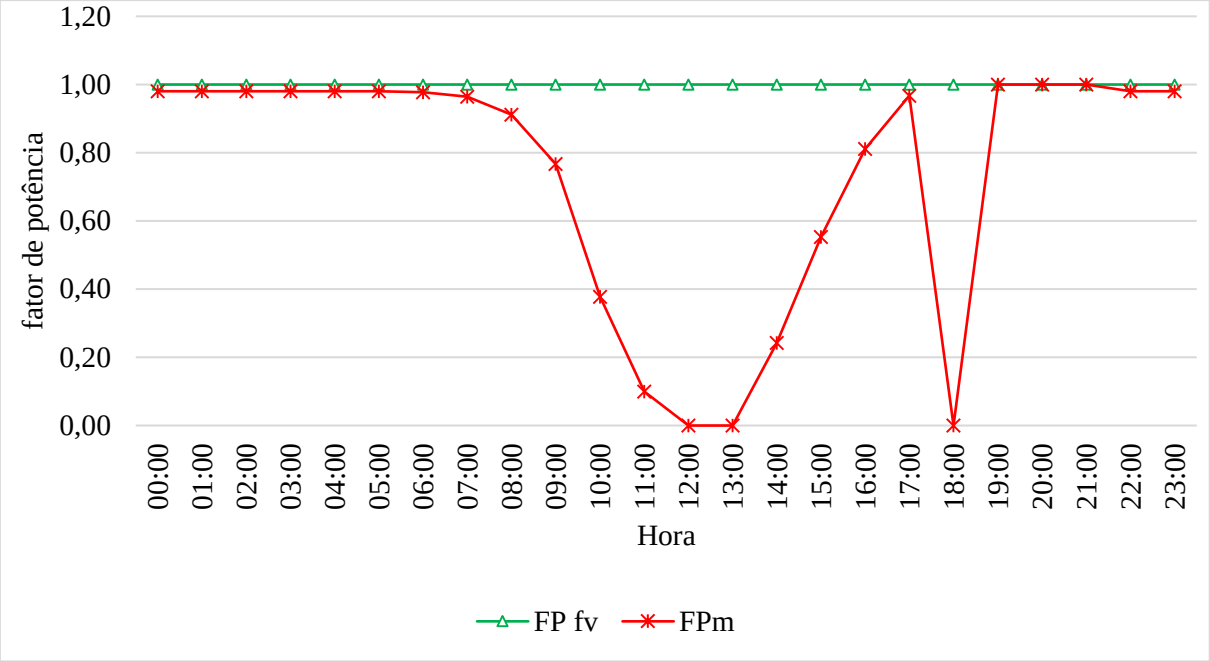
Na Figura 45 é possível verificar que ocorre queda na potência ativa medida/faturada no período de geração fotovoltaica e no período em que existe outro tipo de geração suprindo a unidade, ao passo que a potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 44 e 45. O sistema de geração supre apenas 48% da potência ativa demandada pela carga.

Figura 46 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 – Potência reativa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 47 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 - Fator de potência.



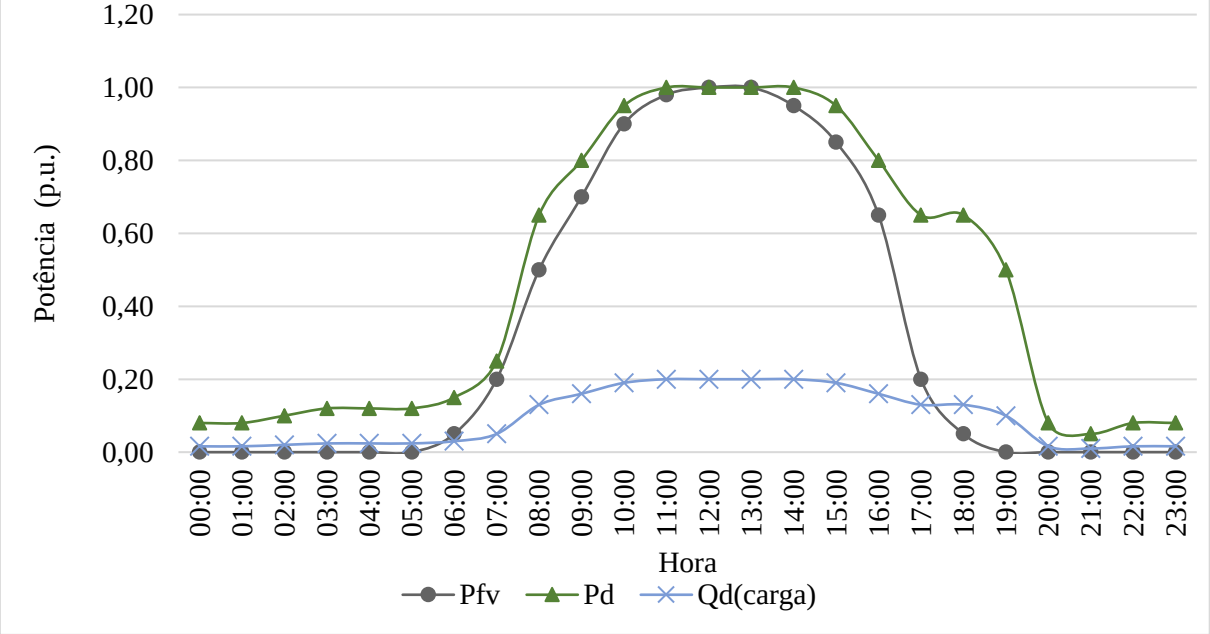
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verifica-se que à medida que a GD vai suprindo a demanda de potência ativa ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição, exceto quando o segundo gerador abastece a carga, conforme pode ser observado na Figura 47. O faturamento da potência reativa pode ser visto na Figura 46. O comportamento da curva de faturamento de potência reativa assemelha-se ao apresentado nos modos de operação 1 e 2 de dias normais. Logo, existe cobrança de potência e demanda de potência reativa em alguns períodos do dia. Para que tal cobrança não seja efetuada, deverá ser utilizado o sistema de compensação de potência reativa. Tal fato, como nos casos anteriores, acarretará na elevação do custo de instalação da planta FV, interferindo também na taxa de retorno do investimento.

4.4.4 Modo de Operação 4

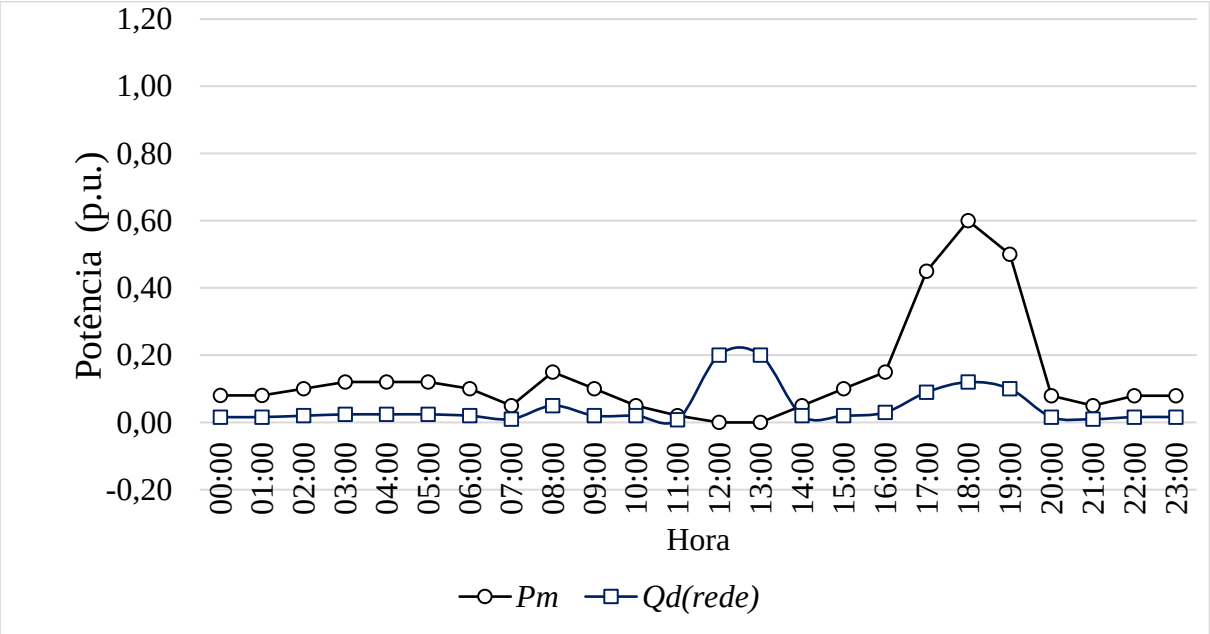
Considerando que a GDFV fornece potência ativa e potência reativa, na unidade com perfil apresentado na Figura 25-(a) obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 48, 49, 50 e 51.

Figura 48 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais).



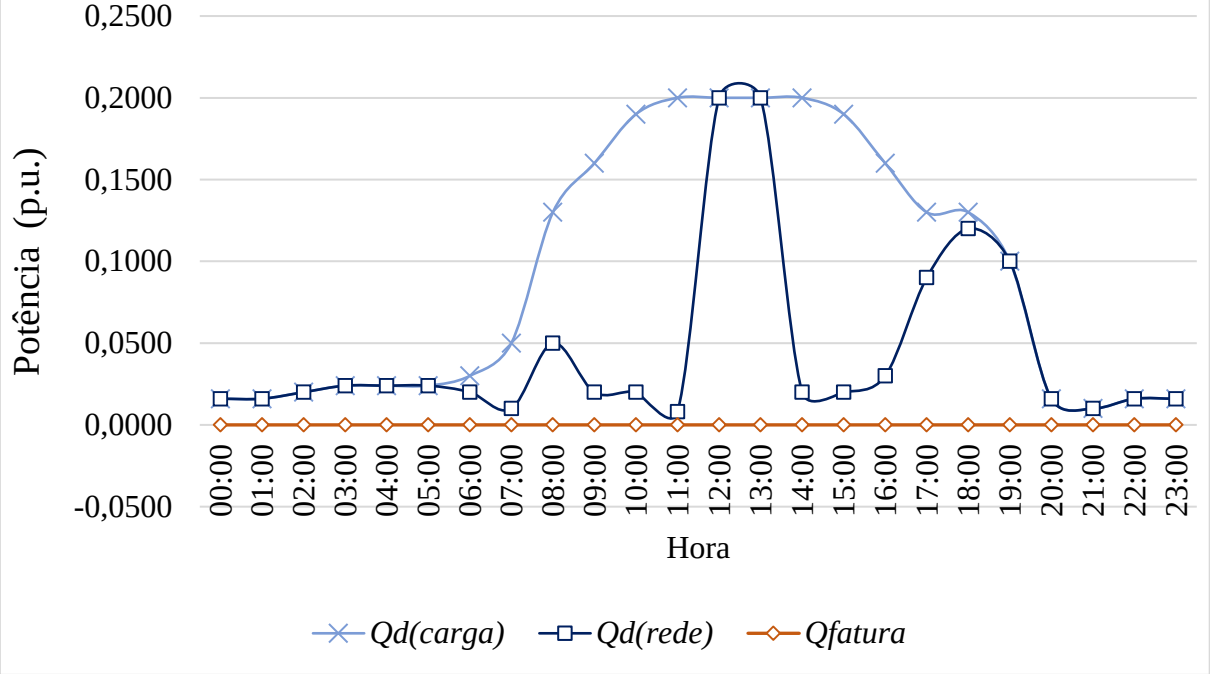
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 49 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Potência ativa medida e demanda reativa (dias normais).



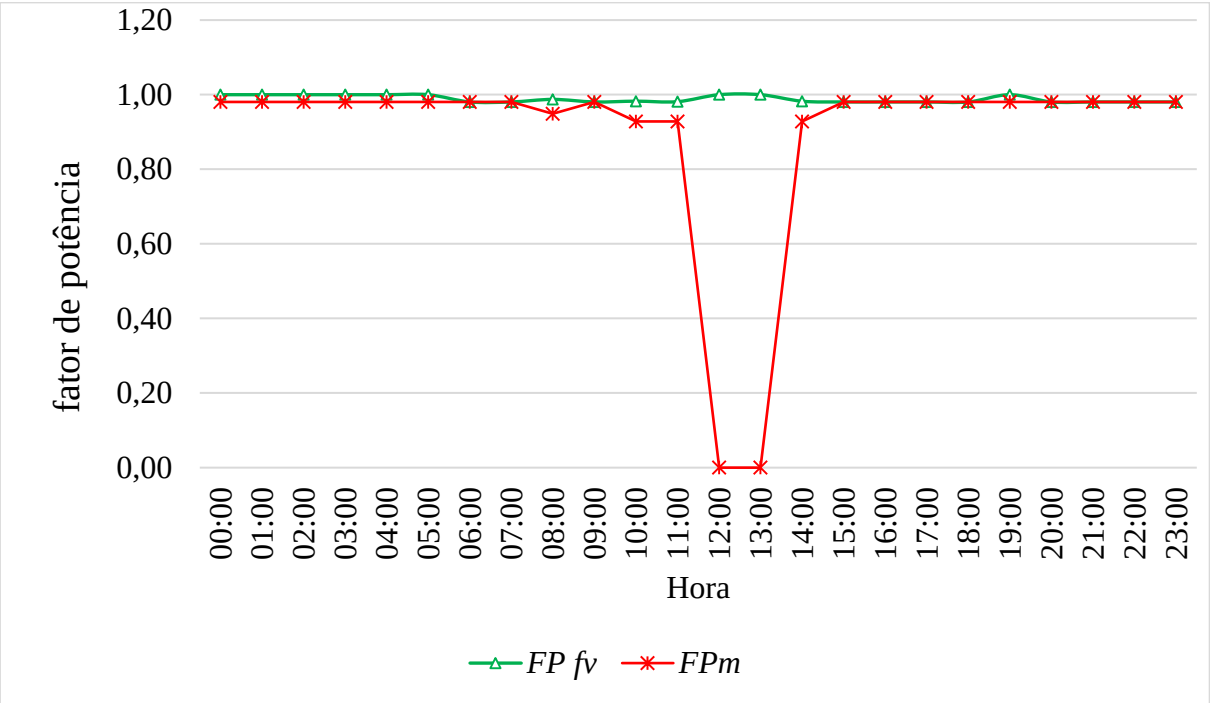
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 50 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 com correção de FP – Potência reativa (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 51 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (dias normais) com correção de FP.

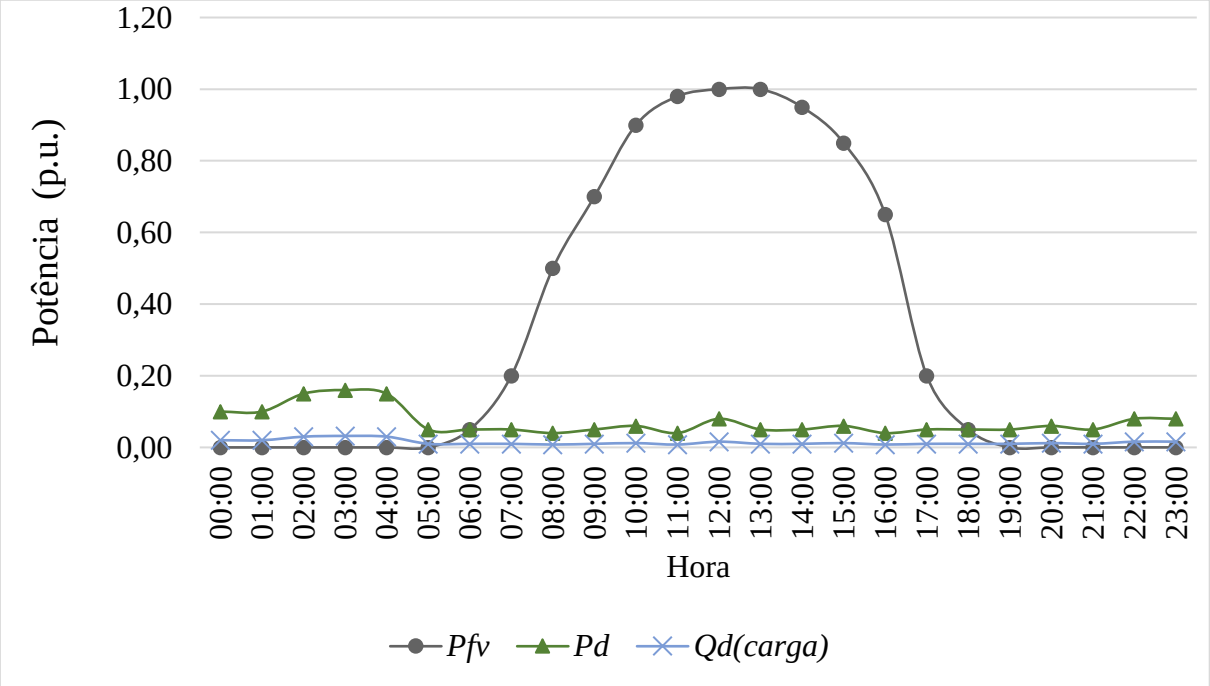


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ao analisar Figura 49 verifica-se que o comportamento da curva de potência ativa medida permanece nos mesmos níveis apresentados no modo de operação 1 para dias normais. A potência reativa que a carga demanda da rede é consideravelmente reduzida, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 48 e 49. Tal efeito dá-se pelo fato de que o inversor está atuando na compensação desta potência, como forma de não violar para baixo o nível do fator de potência de referência. Contudo, nos períodos de máxima geração é priorizada a produção de potência ativa causando queda no nível do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição conforme apresentado na Figura 51. Isso é feito com o objetivo da não elevação de custos na aquisição de sistema de inversão de maior potência. Conforme pode ser observado Figura 50, não ocorre faturamento de potência reativa, uma vez que no instante da violação do nível de FP a potência ativa demandada da rede é zero.

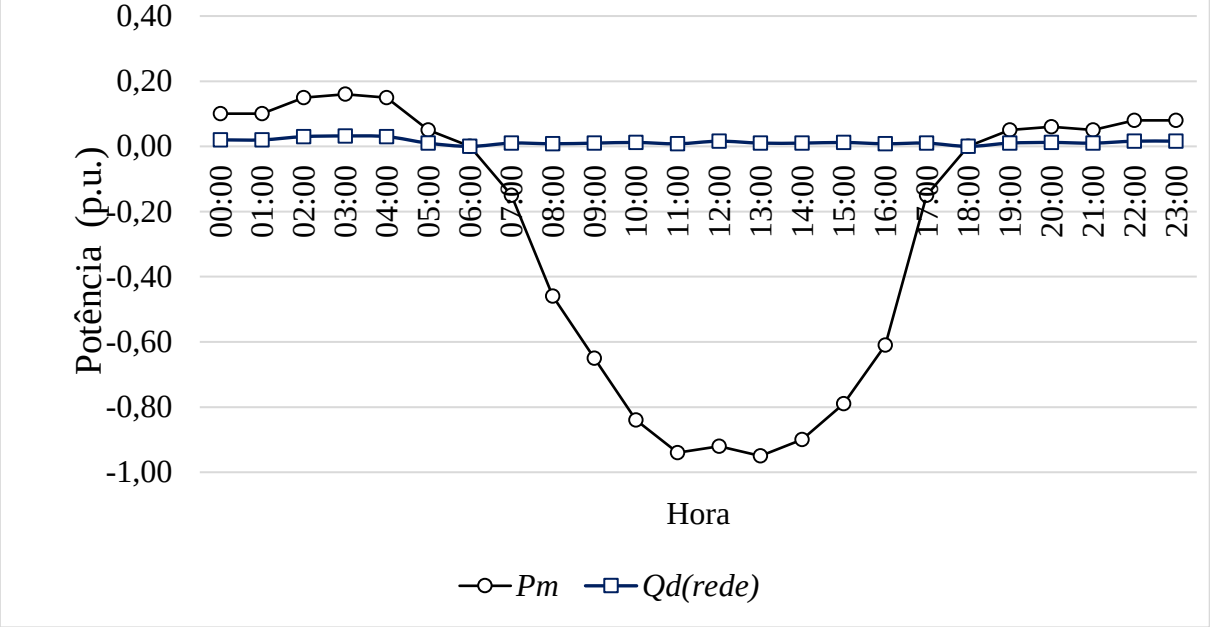
Para analisar o comportamento em dias de feriado e finais de semana considera-se também que a GDFV fornece potência ativa e potência reativa. Na unidade com perfil apresentado na Figura 25-(b) obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 52, 53, 54 e 55. Na Figura 52 apresenta-se o modo de operação da unidade 2 em concomitância com a GDFV nos finais de semana e/ou feriados.

Figura 52 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados).



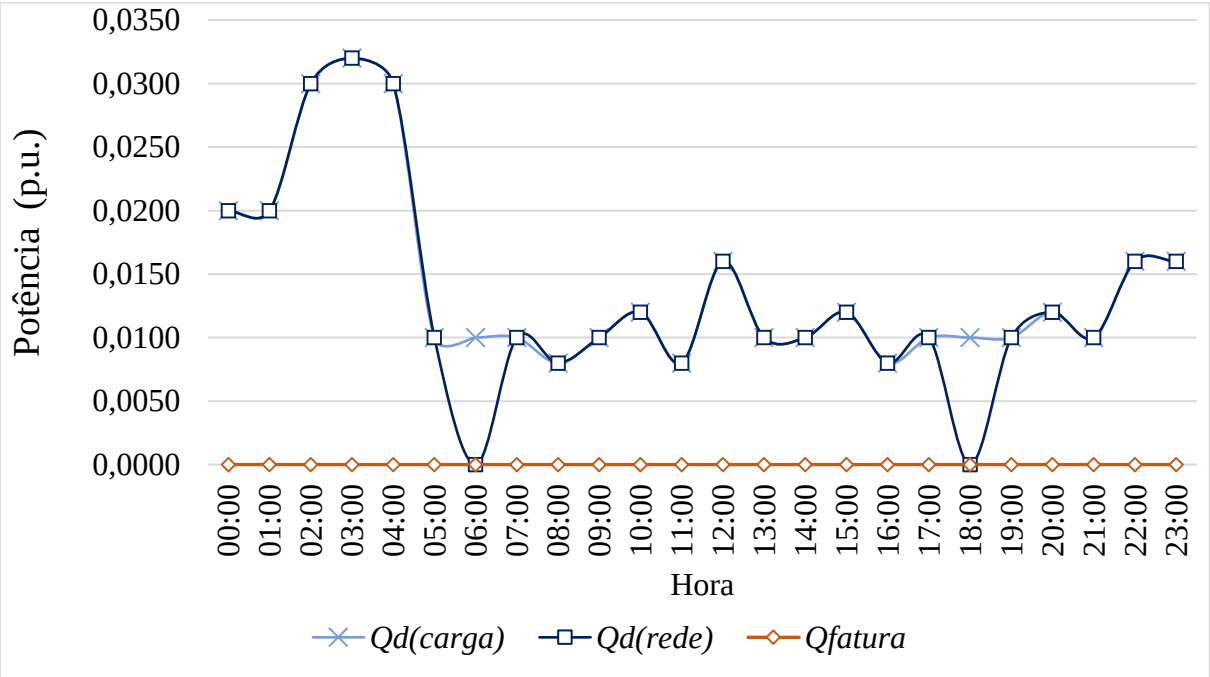
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 53 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados).



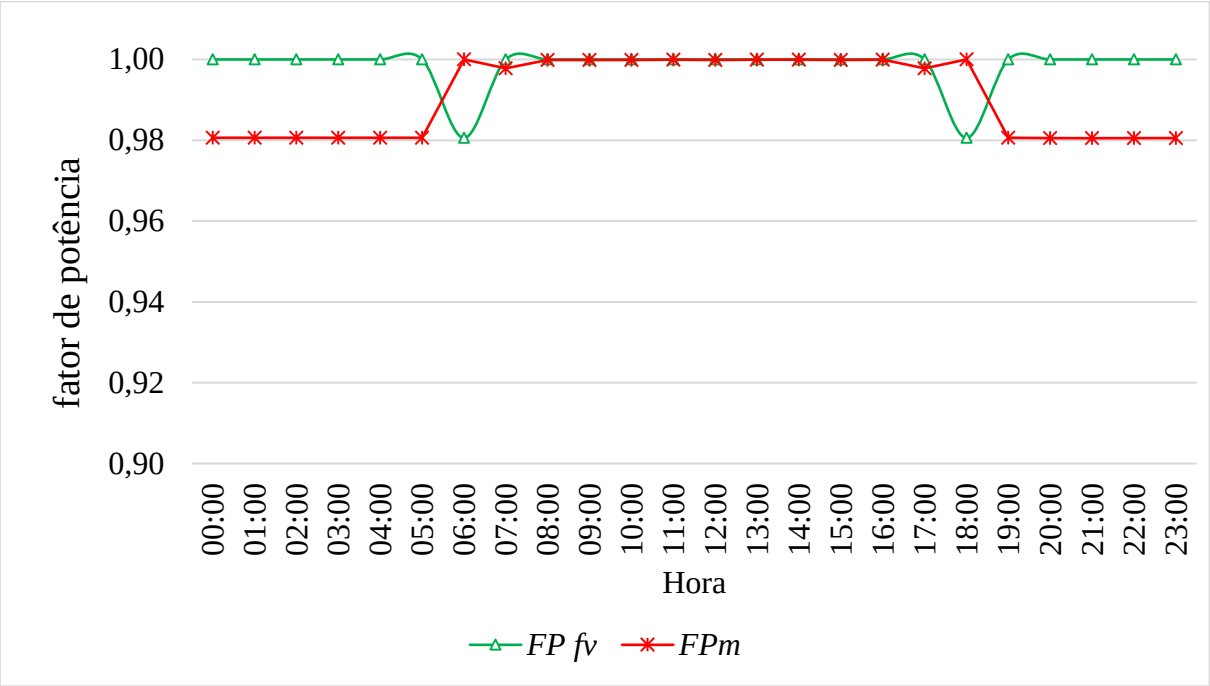
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 54 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Potência reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 55 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 1 – Fator de potência (finais de semana e feriados).



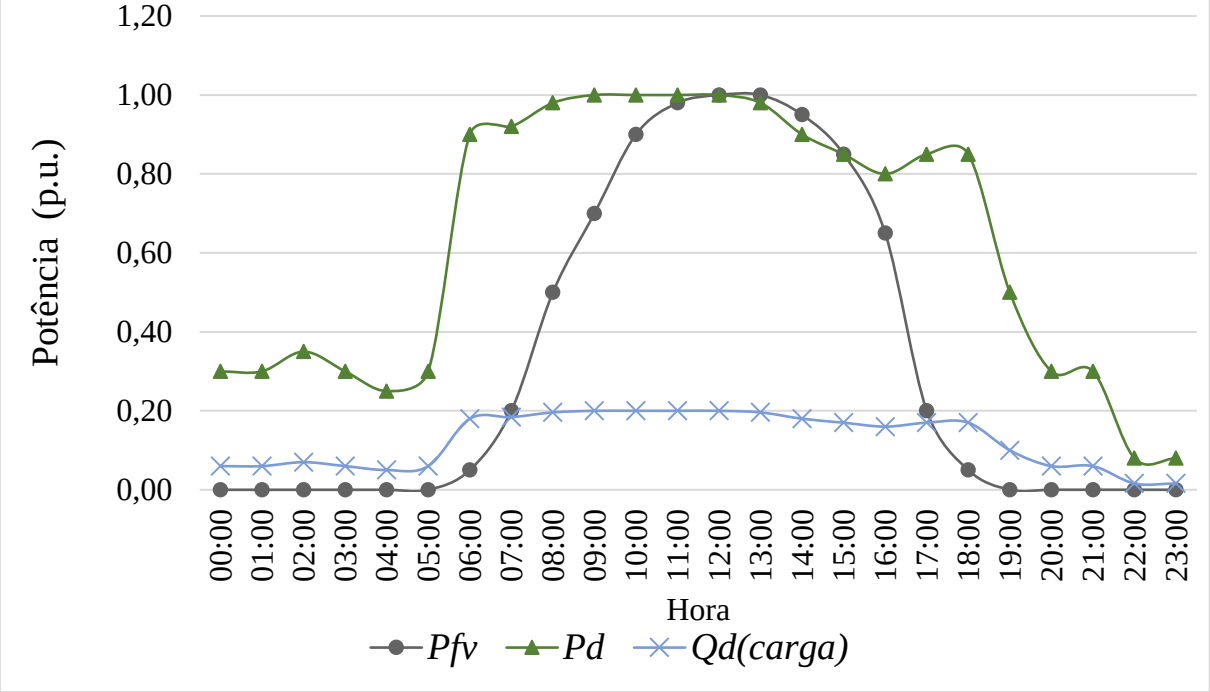
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 53 é possível verificar que no período entre as 06h e as 18h ocorre injeção de potência ativa na rede. Comparando as Figura 52 e 53 verifica-se que a potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original. Logo, o fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição permanece dentro dos níveis aceitáveis, conforme pode ser observado na Figura 55, não existindo faturamento da potência reativa, como pode ser visto na Figura 54.

4.4.5 Modo de Operação 5

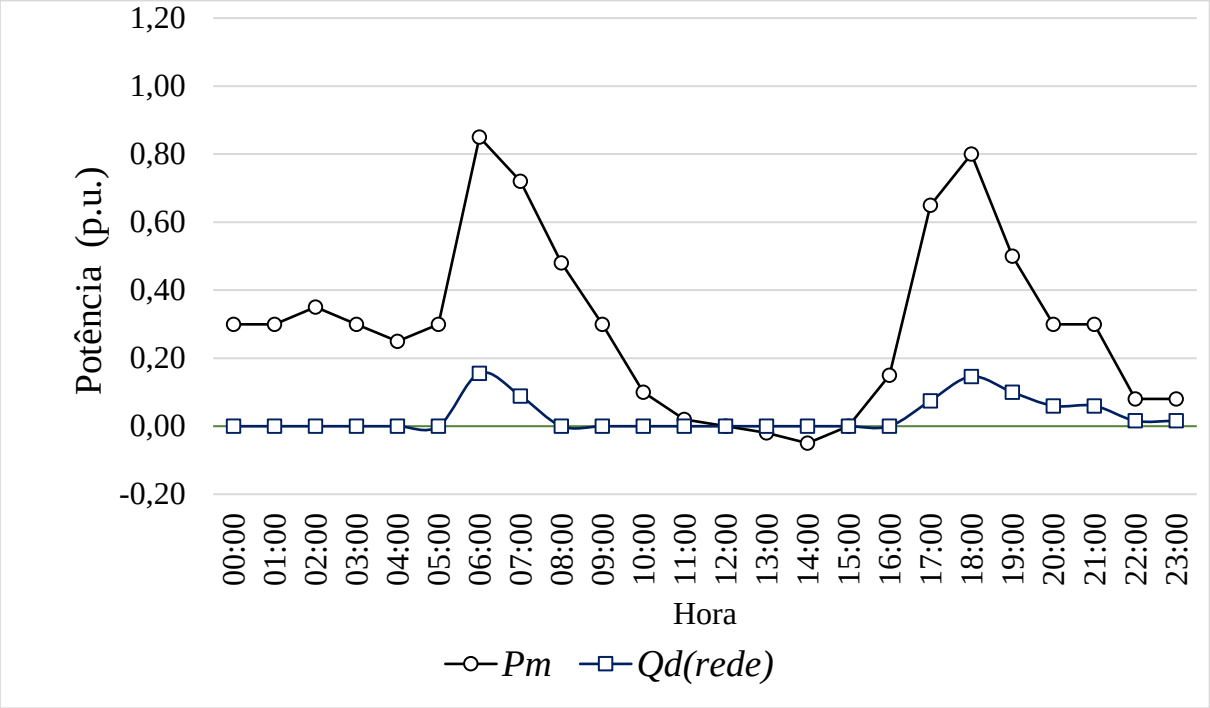
Neste caso também considera-se que a GDFV fornece tanto potência ativa quanto potência reativa. Na unidade com perfil apresentado na Figura 26-(a) obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 56, 57, 58 e 59.

Figura 56 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Geração FV e Potência demandada pela carga (dias normais).



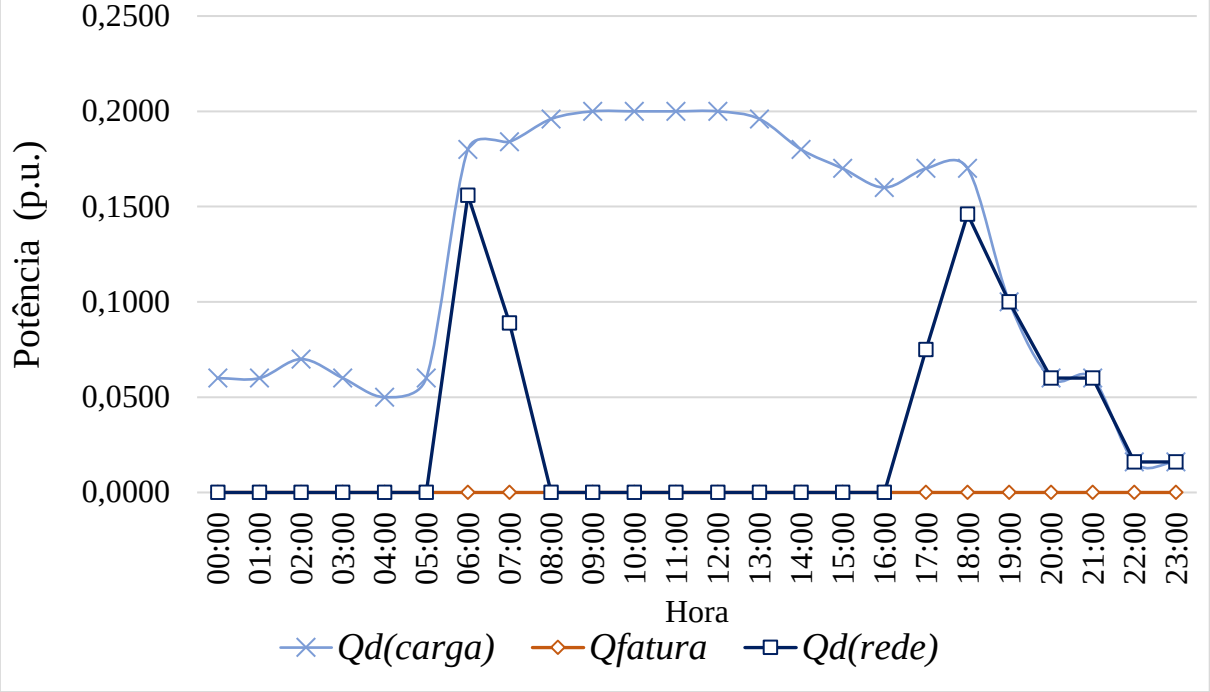
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 57 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 (dias normais) – Potência ativa medida e demanda reativa.



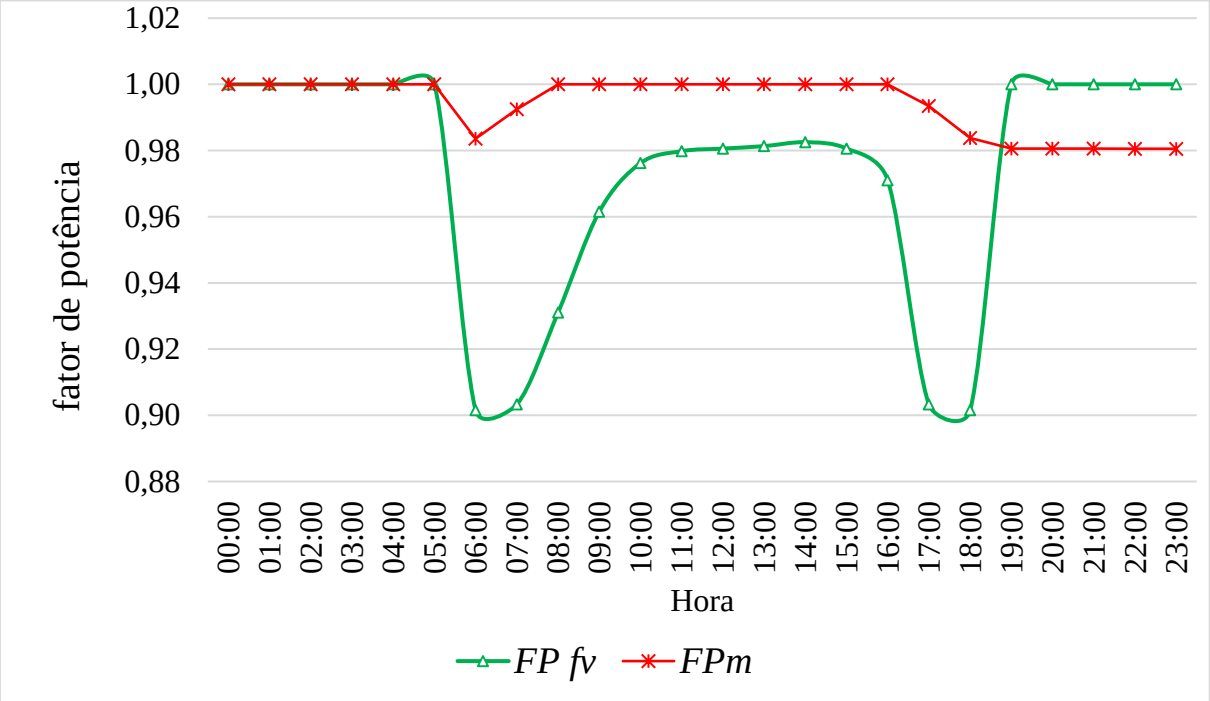
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 58 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (dias normais).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 59 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Fator de potência (dias normais).

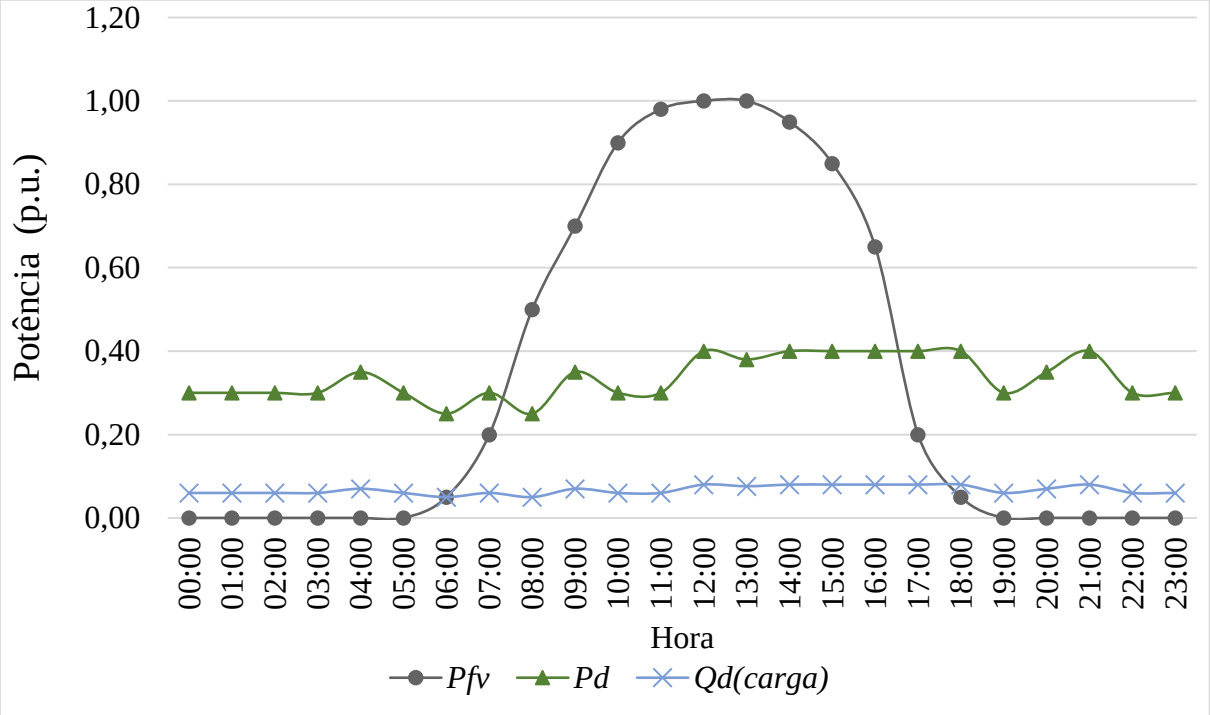


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ao se analisar a Figura 57 verifica-se que o comportamento da curva de potência ativa medida permanece nos mesmos níveis apresentados no caso 2 para dias normais. A potência reativa que a carga demanda da rede é consideravelmente reduzida, conforme é possível verificar ao comparar as Figura 56 e 57. Tal efeito dá-se pelo fato de que o inversor está atuando na compensação desta potência como forma de não violar para baixo o nível do fator de potência de referência, inclusive nos períodos de geração nominal mantendo o nível do fator de potência (*FPm*) visto pelo sistema de medição próximo ao unitário conforme se observa na Figura 59. Esse modo de operação causará elevação nos custos de aquisição de sistema de inversão de maior potência. Conforme pode ser observado na Figura 58, não ocorre faturamento de potência reativa, uma vez que no instante da violação do nível de FP a potência ativa demandada da rede é zero.

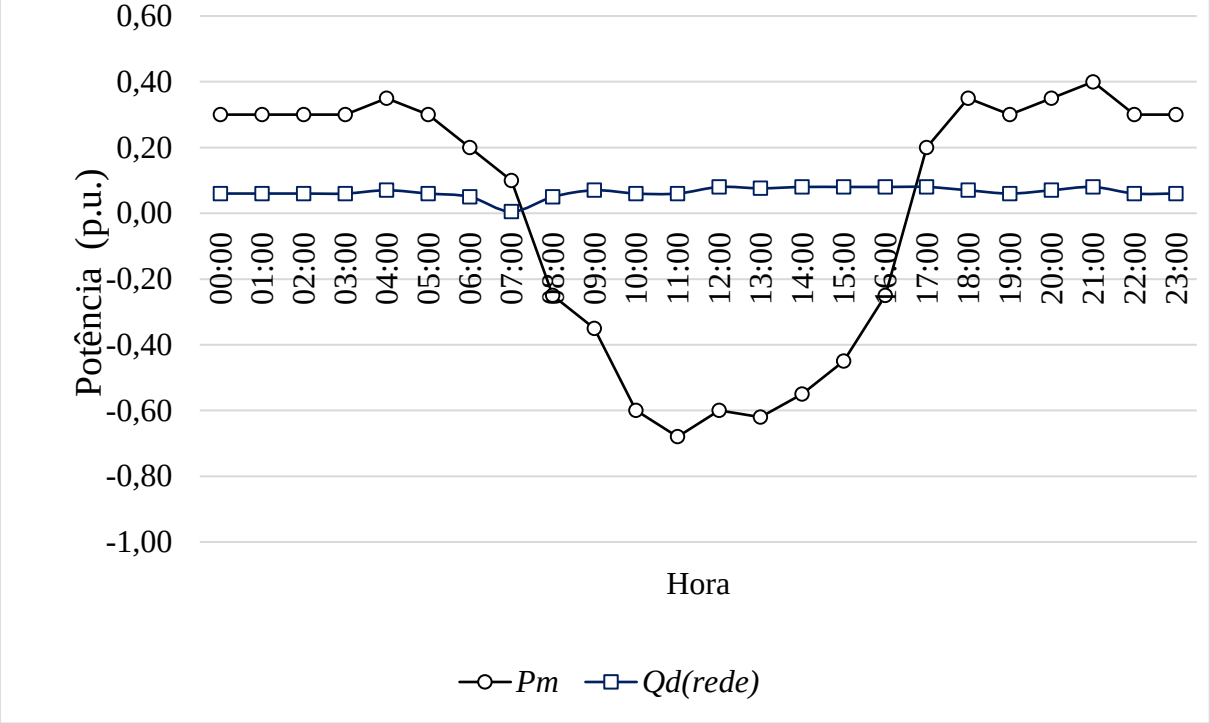
Para analisar o comportamento em dias de feriado e finais de semana da unidade 2 considera-se também que a GDFV fornece potência ativa e potência reativa. Na unidade com perfil apresentado na Figura 26-(b), obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 60, 61, 62 e 63. Na Figura 60 verifica-se o modo de operação da unidade 2 em concomitância com a GDFV com correção de FP nos finais de semana e/ou feriados.

Figura 60 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Geração FV e Potência demandada pela carga (finais de semana e feriados).



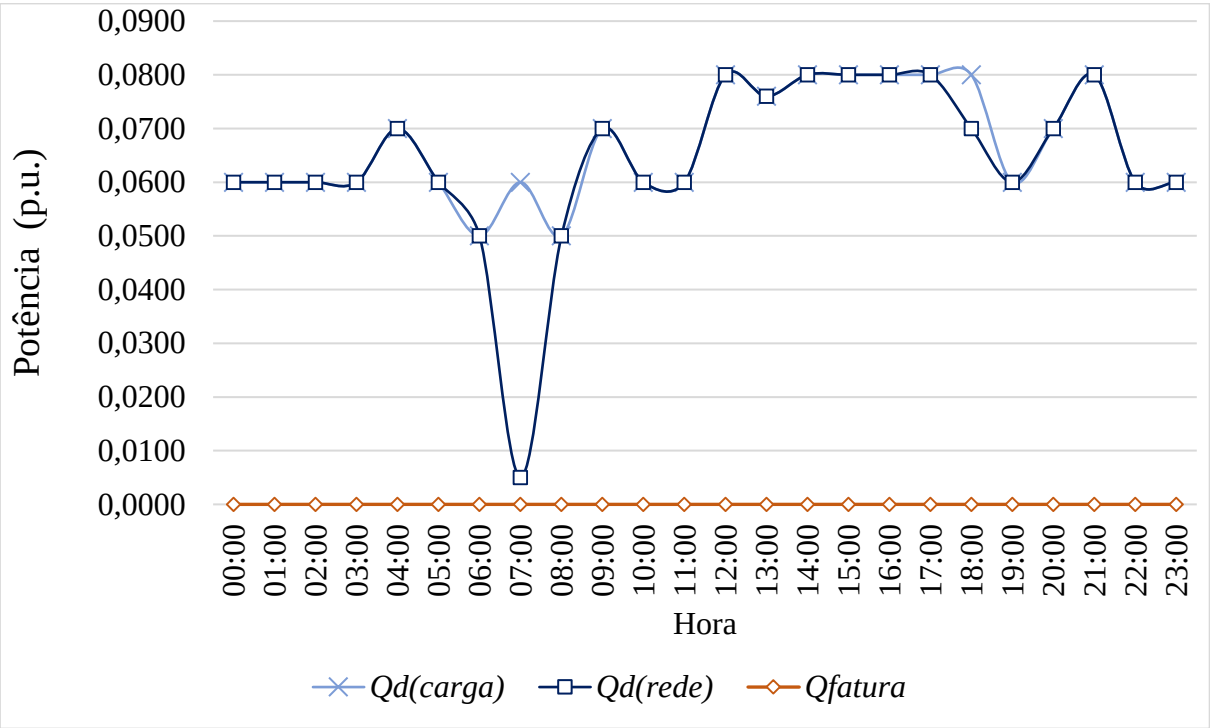
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 61 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência ativa medida e demanda reativa (finais de semana e feriados).



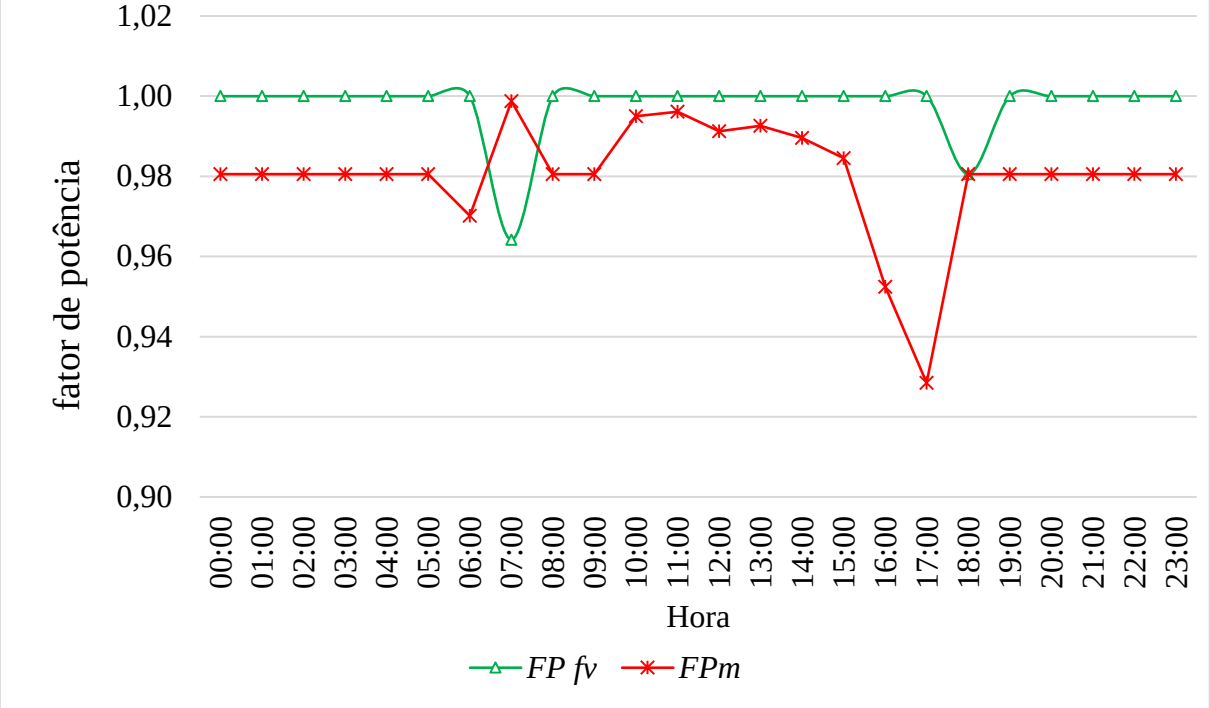
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 62 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Potência reativa (finais de semana e feriados).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 63 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 2 – Fator de potência (finais de semana e feriados).



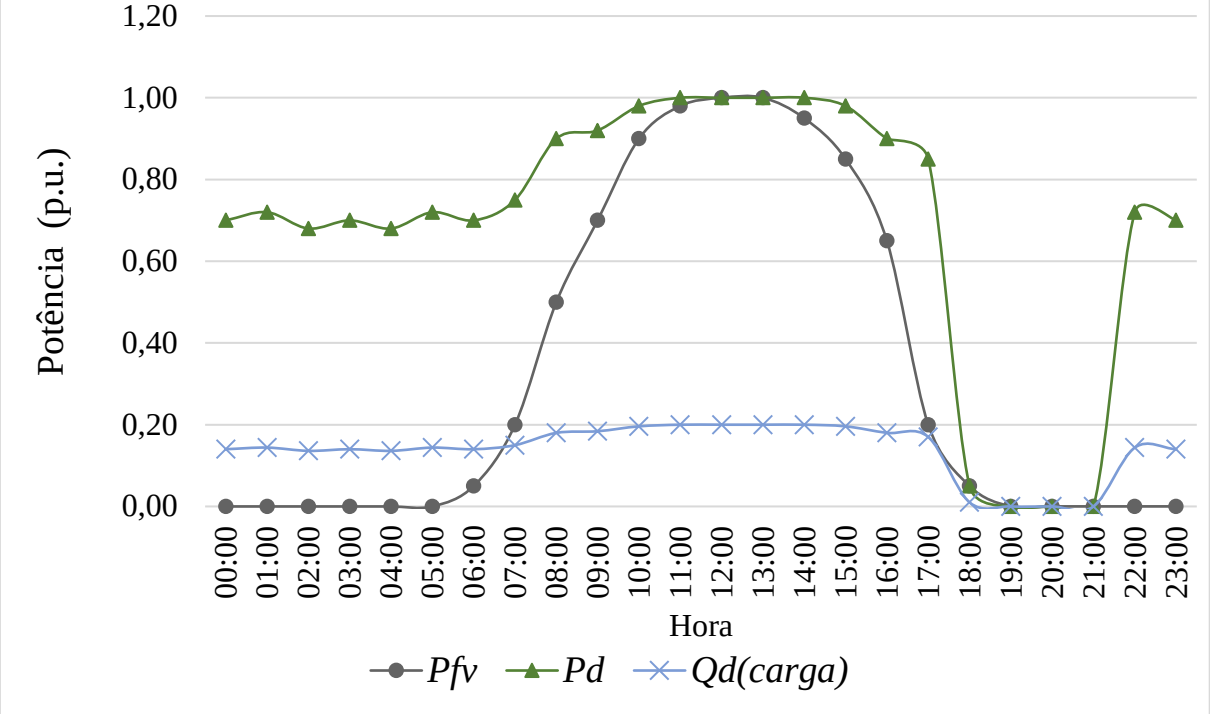
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 61 observa-se que ocorre uma redução da potência ativa medida/faturada e no período entre as 7:10h e as 16:50h ocorre injeção de potência ativa na rede. Do mesmo modo que ocorre em dias normais a potência reativa que a carga demanda da rede permanece no patamar original, conforme Figura 60 e 61, exceto nos períodos em que o sistema de inversão atua para compensar a demanda de potência reativa da unidade. O fator de potência (*FPm*) permanece dentro dos níveis aceitáveis, conforme pode ser observado na Figura 63, não incorrendo no faturamento da potência reativa, como pode ser visto na Figura 62. Logo, ao utilizar o sistema nesta configuração não ocorre uma elevação no custo de instalação da planta FV. Contudo, esse modo de operação não é permitido pela legislação.

4.4.6 Modo de Operação 6

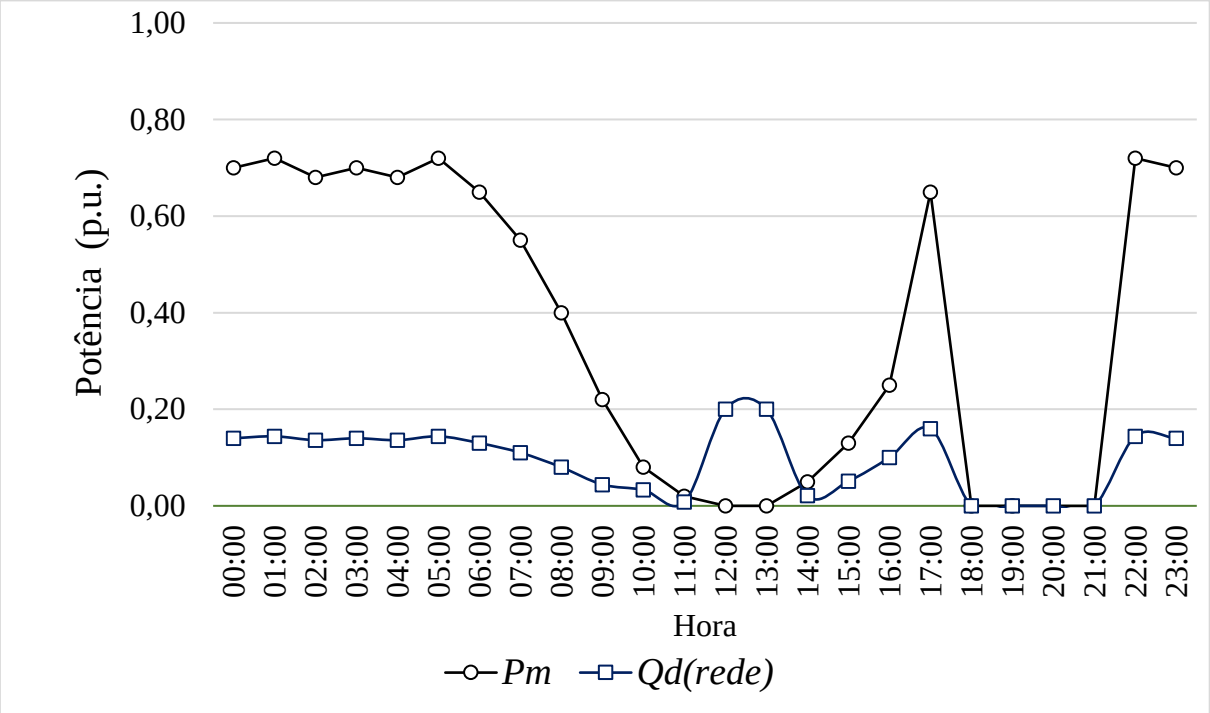
Considerando-se que o gerador fornece tanto potência ativa quanto potência reativa para a unidade com perfil apresentado na Figura 27 obteve-se as curvas ilustradas nas Figura 64, 65, 66 e 67.

Figura 64 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Geração FV e Potência demandada pela carga.



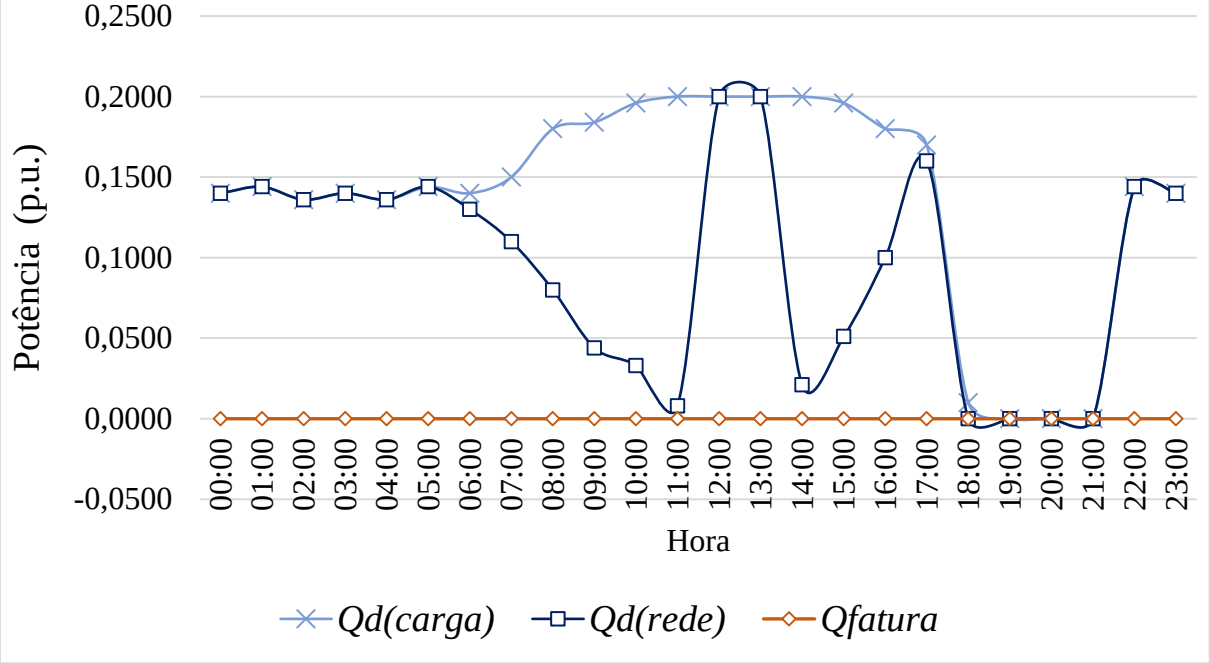
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 65 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Potência ativa medida e demanda reativa.



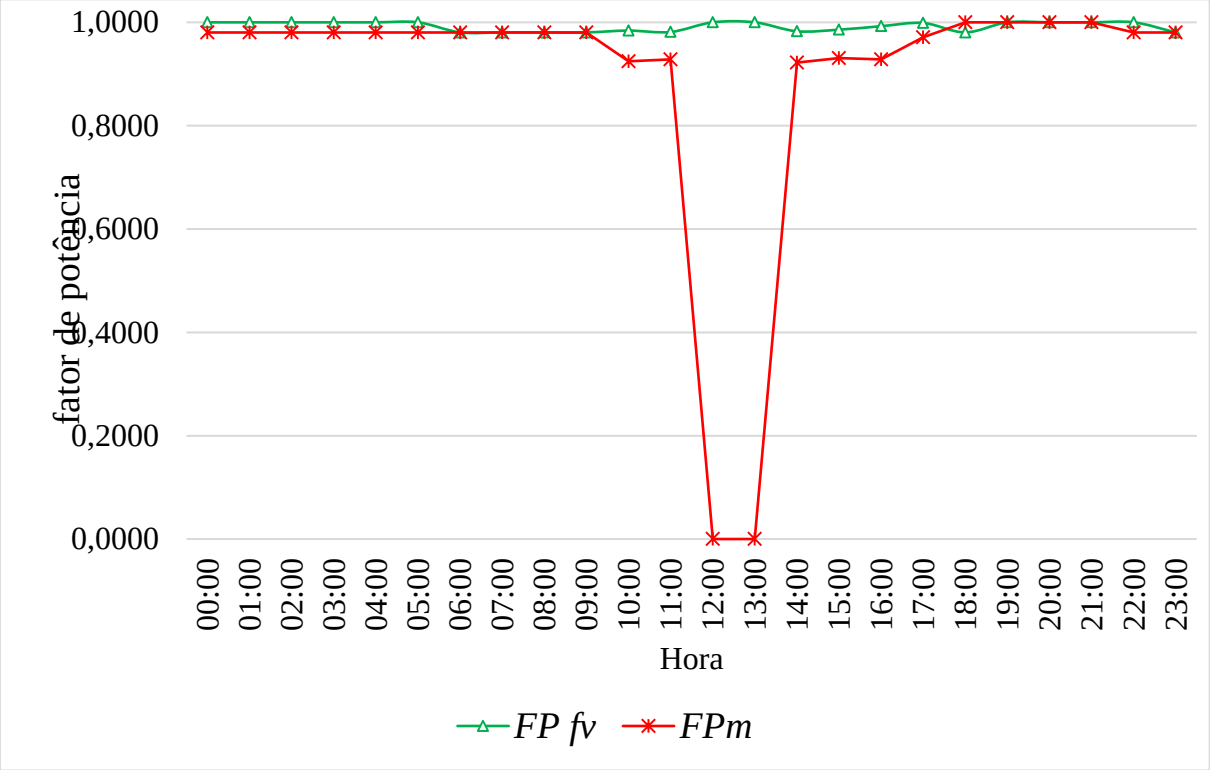
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 66 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Potência reativa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 67 – Perfil de operação da GD na unidade consumidora fictícia 3 com correção de FP – Fator de potência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme pode ser visto na Figura 65, o comportamento da curva de potência ativa medida permanece inalterado, apresentando os mesmo níveis do caso 3. No que se refere à potência reativa que a carga demanda da rede, esta é consideravelmente reduzida uma vez que o inversor está atuando na compensação desta potência, exceto nos períodos de máxima geração onde é priorizado a produção de potência ativa, conforme é possível verificar ao se comparar as Figura 64 e 65. Com isso verifica-se que ocorre uma queda do fator de potência (*FPm*) nos períodos de geração nominal conforme observado na Figura 67. Contudo não existe faturamento da potência reativa, como pode ser visto na Figura 66, uma vez que a geração supre toda a demanda de potência ativa. Tal modo não eleva o custo de instalação da planta FV, contudo este modo de operação não é permitido pela legislação.

5 ESTUDO DE CASO

Neste Capítulo é apresentado e analisado o modo operacional de uma unidade consumidora real com GDFV como forma de mostrar os efeitos práticos. São apresentados os gráficos da variação de consumo de potência ativa e reativa, fator de potência, bem como a variação do valor pago mensalmente pela unidade consumidora. Os gráficos são gerados por programa computacional do tipo planilha eletrônica, onde foram inseridos valores medidos na unidade consumidora. A unidade funciona de 09:00h às 19:00h, de segunda a sexta-feira. É alimentada por rede de distribuição trifásica em 13,8 kV, classificada no grupo A, modalidade tarifaria verde, demanda de potência ativa contratada de 450 kW e geração distribuída fotovoltaica instalada de 400 kWp.

5.1 DESCRIÇÃO DA GDFV INSTALADA

A GDFV foi instalada utilizando a composição já apresentada neste trabalho, bem como um sistema de monitoramento e uma estação meteorológica.

5.1.1 Sistema de Monitoramento e Estação Meteorológica

O sistema de monitoramento é composto de registrador de dados que registra dados e eventos dos inversores, medidores de energia, estações meteorológicas e outros dispositivos da GDFV e atua como um *gateway* da internet para enviar os dados para a plataforma de gerenciamento objetivando o monitoramento de desempenho, monitoramento de condições e relatórios de dados.

A utilização de estação meteorológica tem por objetivo o acompanhamento das condições impostas pelo ambiente, os resultados obtidos são comparados como os resultados de geração da unidade. A estação foi concebida com sensor de temperatura ambiente, sensor de temperatura dos módulos, sensor de irradiação, sensor de direção e velocidade do vento.

5.1.2 Módulos fotovoltaicos

São utilizados 1080 módulos fotovoltaicos de 320W, cada um constituído de 72 células de silício policristalino. Na Tabela 4 são apresentadas as especificações básicas de cada módulo.

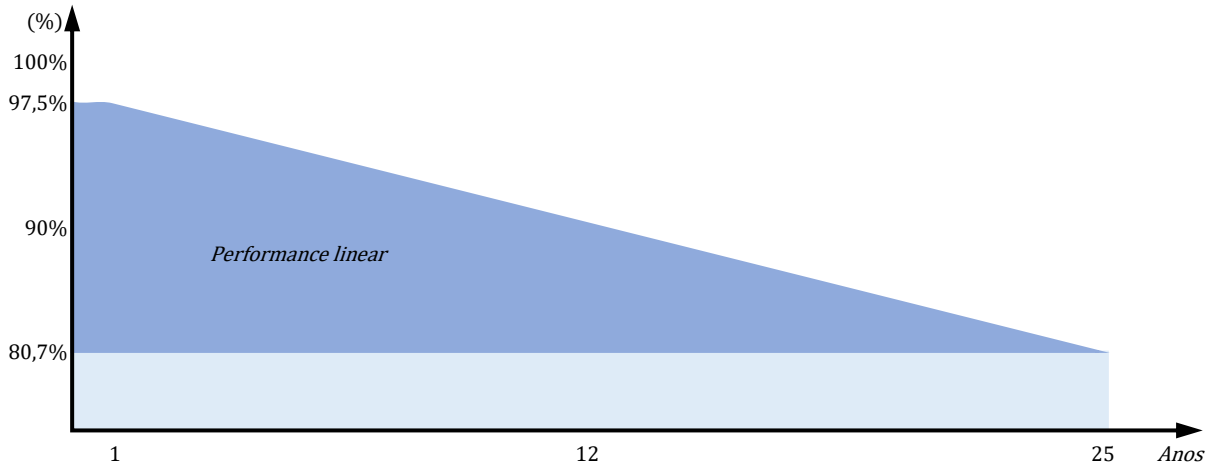
Tabela 4 – Especificações básicas dos módulos utilizados.

Especificações	Irradiância 1000W/m²	Irradiância 800W/m²
Potência máxima	320Wp	238Wp
Tensão máxima	37,4V	34,7V
Corrente máxima	8,56A	6,86A
Corrente de curto circuito	9,05A	7,30A
Eficiência nominal	16,49%	
Temperatura de operação	-40ºC a 85ºC	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Sabe-se que as células de silício devido a diversos fatores físico-químicos degradam-se ao longo do tempo. A Figura 68 apresenta a performance total do módulo ao longo dos anos.

Figura 68 – Performance linear de funcionamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tal diminuição da performance de geração de energia elétrica dos módulos impactará diretamente na taxa de retorno do investimento.

5.1.3 Sistema de Inversão

A GDFV foi concebida com 6 unidades de inversores trifásicos de 50 kWp nominais, sem transformador, com tensão máxima de entrada de 1.000 V e índice de proteção IP 65.

A estrutura interna do inversor é composta de dois estágios de conversão, sendo um composto de um conversor CC-CC e um conversor CC-CA. Não possui transformador de isolamento interno, logo não possui isolamento galvânico entre a entrada e a saída.

Na Tabela 5 são apresentadas as características básicas dos inversores utilizados.

Tabela 5 – Características básicas dos inversores utilizado.

Entrada CC	Faixa de tensão de entrada na máxima potência	520 – 800V
	Tensão máxima de entrada	1.000V
	Corrente máxima de entrada	100A
	Corrente máxima de curto-circuito de entrada	170A
	Potência elétrica máxima do arranjo	51,25kW
	Número de rastreadores do ponto de máxima potência (MPPT)	1
Saída CA	Faixa de tensão de entrada na máxima potência	422 – 528V
	Tensão nominal da rede	480 V
	Corrente máxima de saída	66 A
	Potência Ativa nominal	50kW
	Potência Aparente nominal	50kVA
	Fator de potência (Indutivo ou Capacitivo).	> 0,995
	Faixa de frequência da rede	57 – 63Hz
Dados gerais	Eficiência máxima de conversão CC/CA:	98,3%
	Eficiência CEC:	97,5%
	Humidade relativa	0 a 100%
	Altitude operacional máxima sem degradação	2000m
	Faixa de temperatura ambiente permitida	– 25°C a +60°C

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.2 PERFIL DE OPERAÇÃO

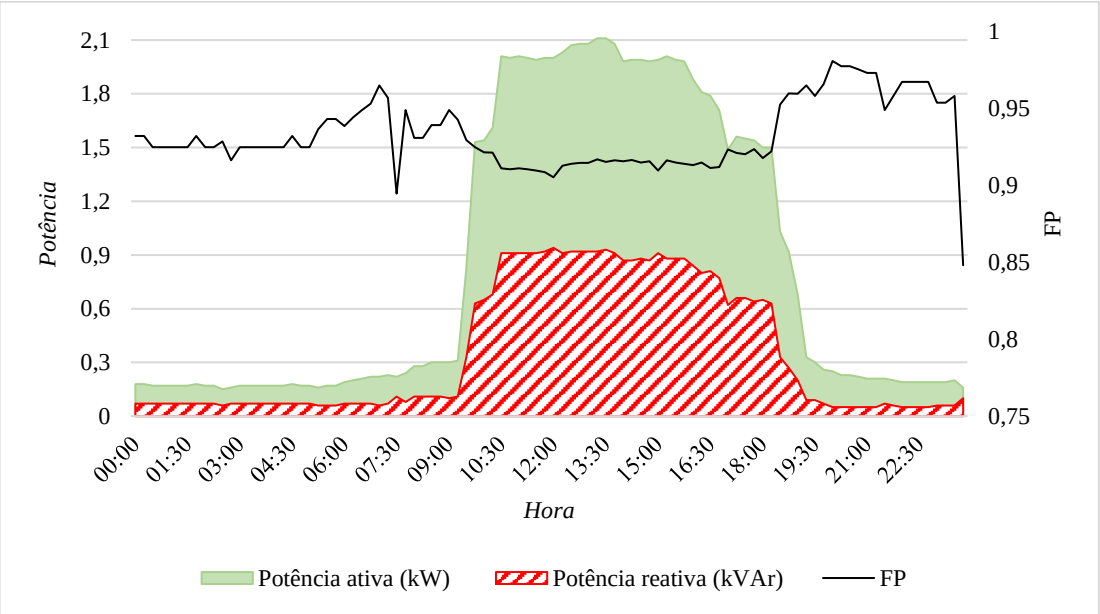
Nesta seção é apresentado o perfil de operação da unidade consumidora como forma de aferir os impactos causados pela instalação da GDFV na unidade. Buscou-se ilustrar o perfil de carga da unidade sem a inserção da GD. Foi escolhido um período de uma semana que melhor representa o funcionamento típico da unidade. Isto fornecerá parâmetros para comparar os valores obtidos após a instalação da geração distribuída na unidade.

5.2.1 Perfil de Operação sem GDFV

Objetivando subsidiar uma análise dos impactos gerados pela instalação da GDFV, são apresentadas as curvas de funcionamento característico da unidade em estudo. Os gráficos das curvas de cargas faturadas diárias e do comportamento do fator de potência são gerados

através de software computacional (planilha eletrônica), utilizando os dados reais medidos na unidade consumidora em estudo. Na Figura 69 é apresentado um perfil de funcionamento típico da unidade consumidora em um dia útil, antes da instalação da GDFV.

Figura 69 – Perfil de operação típico da unidade consumidora sem GDFV (dias úteis).



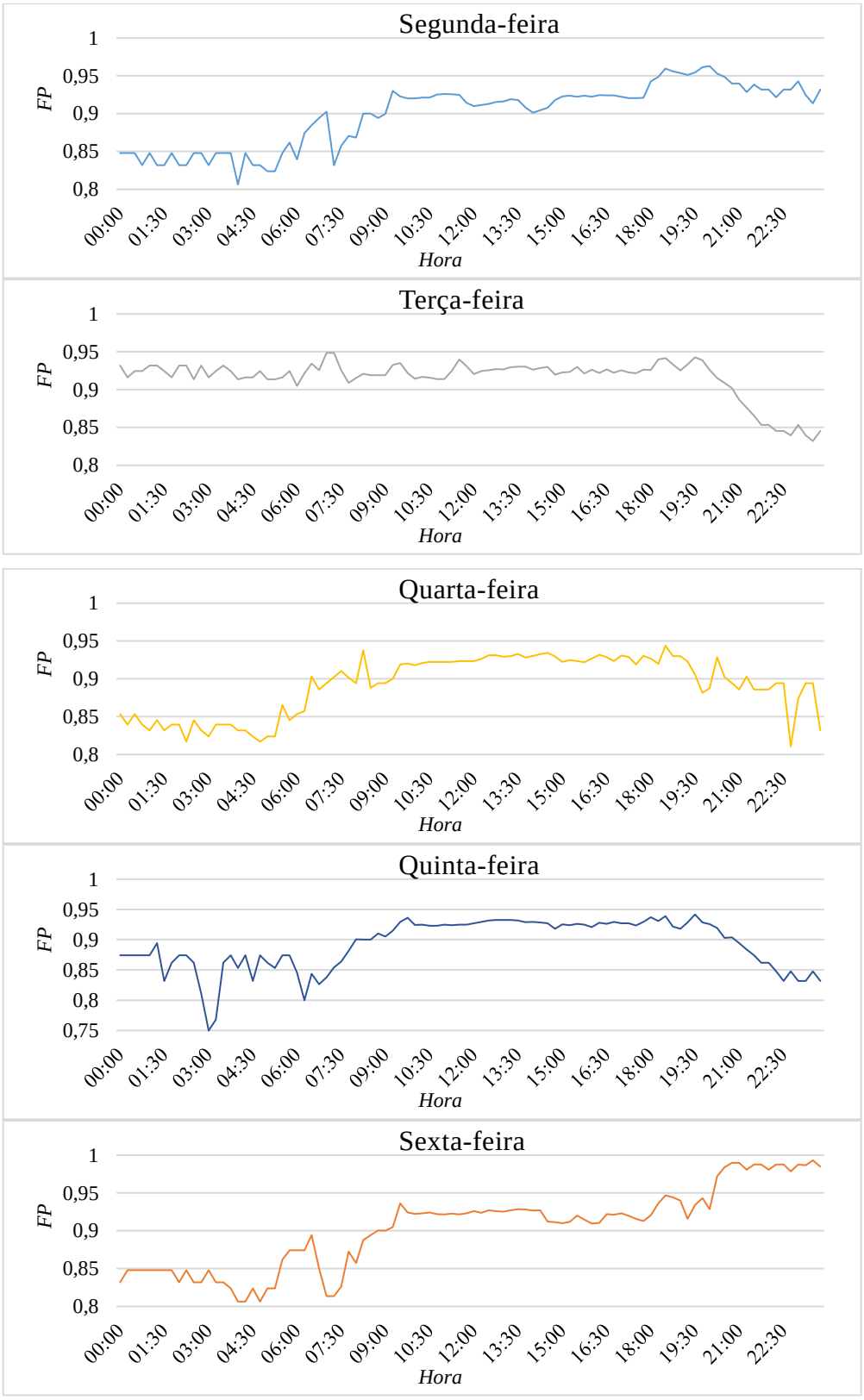
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando a Figura 69 verifica-se que em dias normais de funcionamento a unidade apresenta violações do nível de fator de potência (indutivo). Tais eventos ocorrem devido ao mau funcionamento do sistema de compensação instalado na unidade.

Foi observado que as curvas de consumo possuem comportamentos semelhantes, apresentando algumas variações de um dia para o outro. Tais variações encontram-se dentro do esperado, uma vez que apresentam o comportamento dinâmico do sistema.

Na Figura 70 são apresentadas as curvas de fator de potência da unidade consumidora antes da instalação da GDFV.

Figura 70 – Perfil de fator de potência da unidade consumidora sem GDFV (dias úteis).

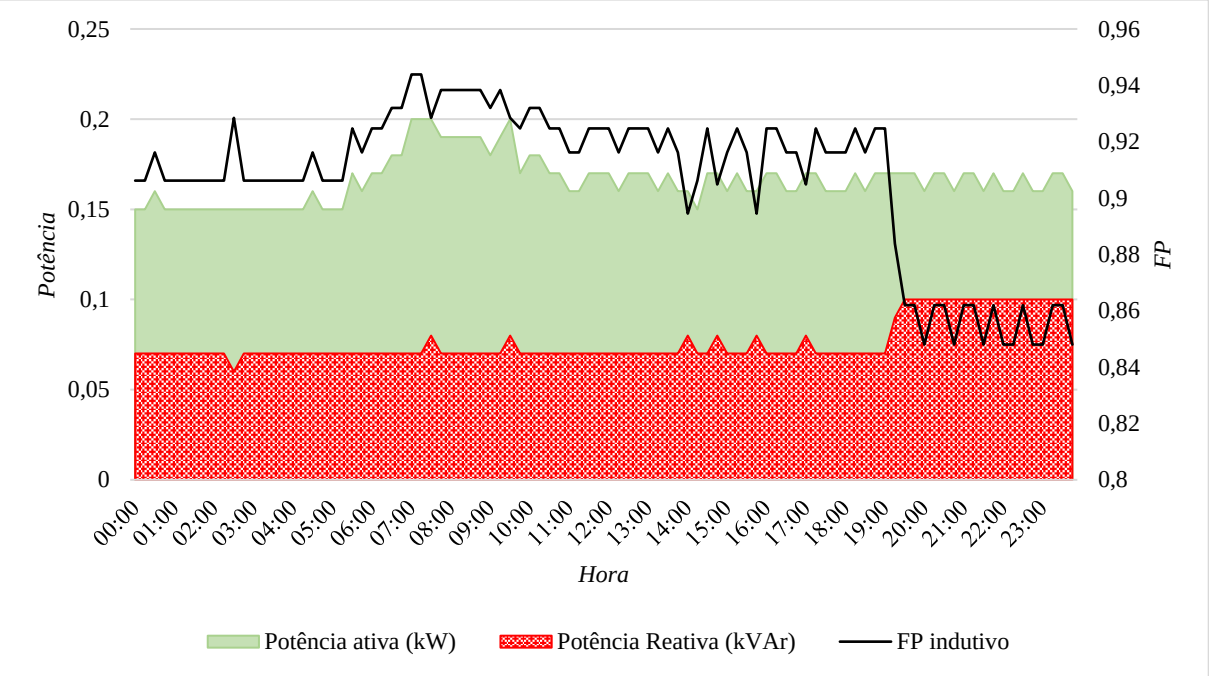


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 70 é possível visualizar que ocorre violações nos níveis de fator de potência da unidade. No período de funcionamento (expediente) da unidade as curvas apresentam comportamento que se aproximam entre si, isso é motivado pelo fato de que o sistema de compensação existente na unidade é acionado de forma manual.

Na Figura 71 é ilustrado um perfil de funcionamento típico da unidade consumidora no final de semana. São apresentadas as curvas de potência ativa, reativa e fator de potência da unidade, sem presença da GDFV.

Figura 71 – Perfil típico de operação da unidade consumidora sem GDFV (final de semana).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando a Figura 71 verifica-se que mesmo no período de final de semana, onde a unidade apresenta baixa demanda, existe violações do nível de fator de potência (indutivo).

Também em períodos de finais de semana e feriados as curvas de consumo possuem comportamentos semelhantes, apresentando pequenas variações de um fim de semana para o outro. Tais varrições também encontram-se dentro da normalidade, uma vez que demonstra o funcionamento dinâmico do sistema.

Na Figura 72 ilustra-se o comportamento em dias não úteis (finais de semana) das curvas de fator de potência da unidade consumidora, antes da instalação da GDFV. São apresentadas as curvas de fator de potência (indutivo) em período de 3 (três) finais de semana.

Figura 72 – Perfil de fator de potência da unidade consumidora sem GDFV (fim de semana).

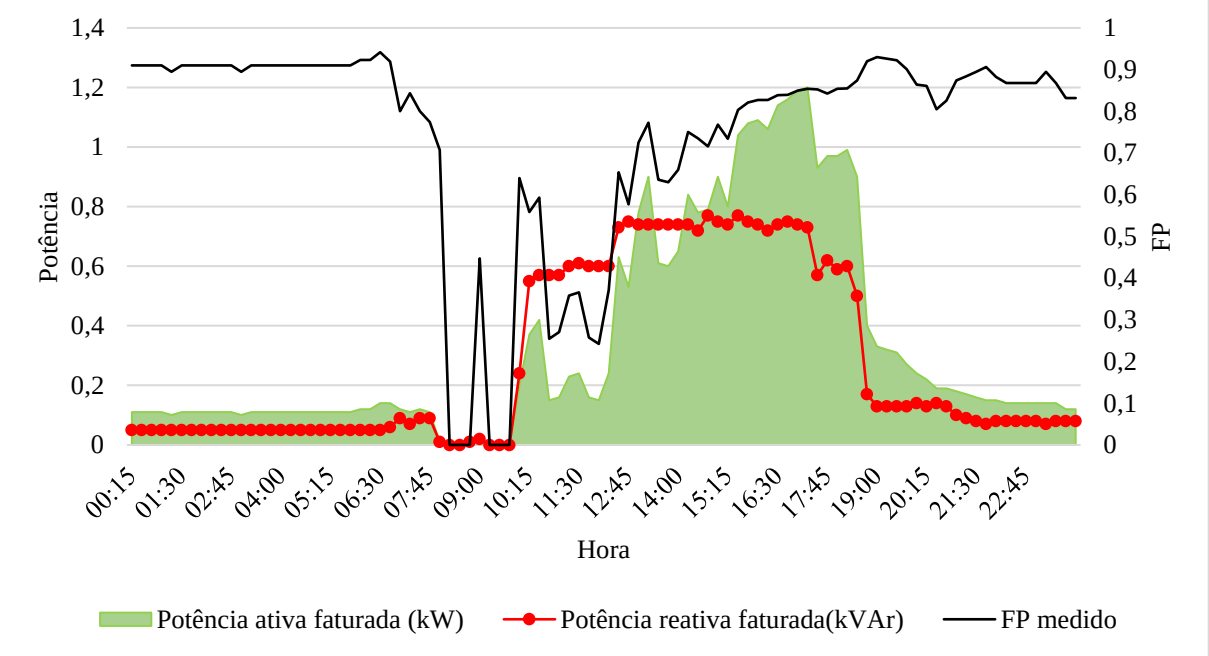
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 72 é possível visualizar as violações nos níveis de fator de potência (indutivo). Vale esclarecer que neste caso não haverá faturamento por violação dos níveis de potência reativa uma vez que em dias de sábados, domingos e feriados apenas é faturada a violação de fator de potência capacitivo. Contudo, fica clara a ineficiência do sistema de compensação existente na unidade.

5.2.2 Perfil de Operação com GDFV

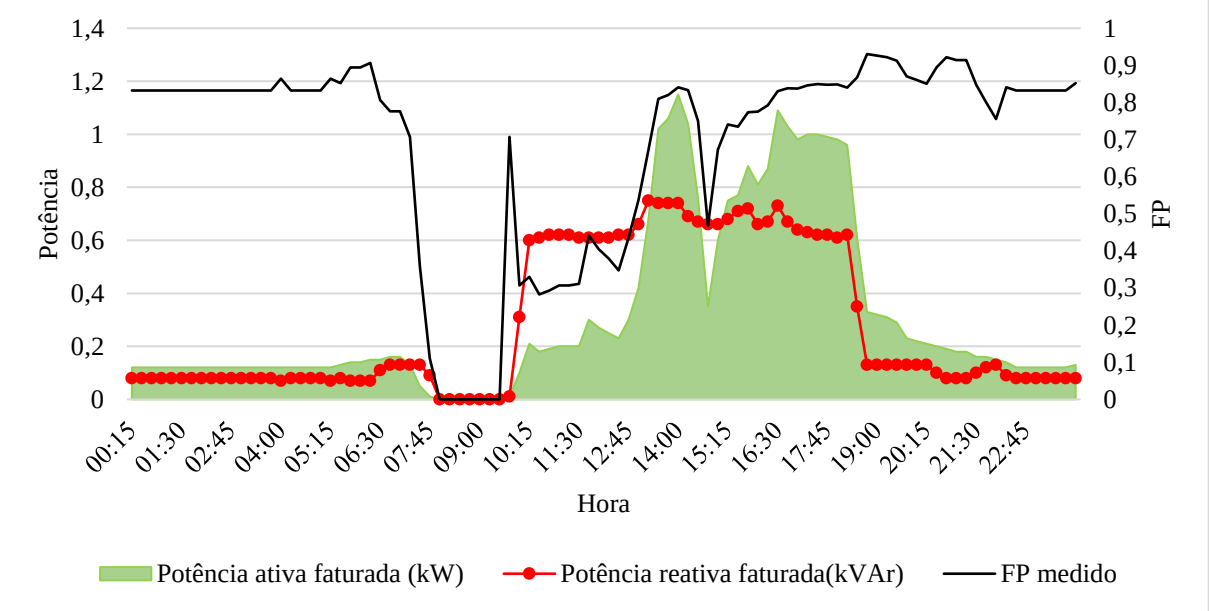
Dando prosseguimento ao levantamento do perfil de operação da unidade consumidora, são apresentados gráficos ilustrativos de funcionamento diário por um período de 10 dias, com o sistema de GDFV ativo. Nas Figura 73 a 82 são apresentados os perfis de operação no período.

Figura 73 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 1º dia.



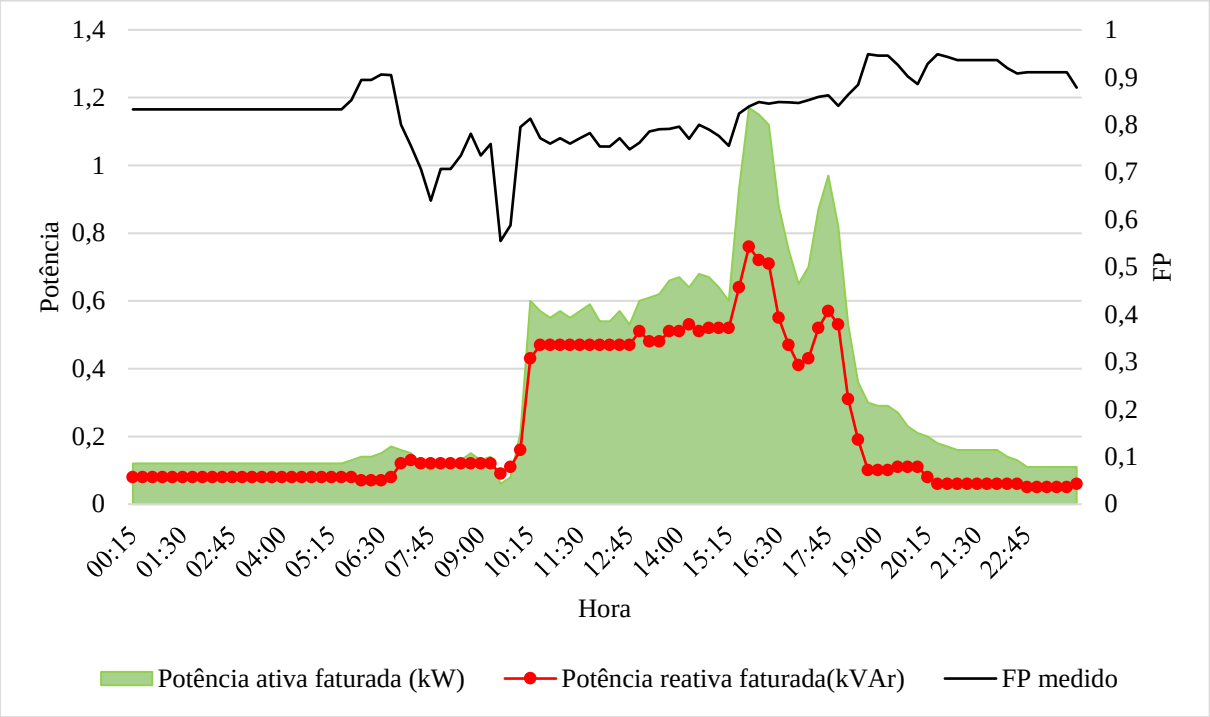
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 74 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 2º dia.



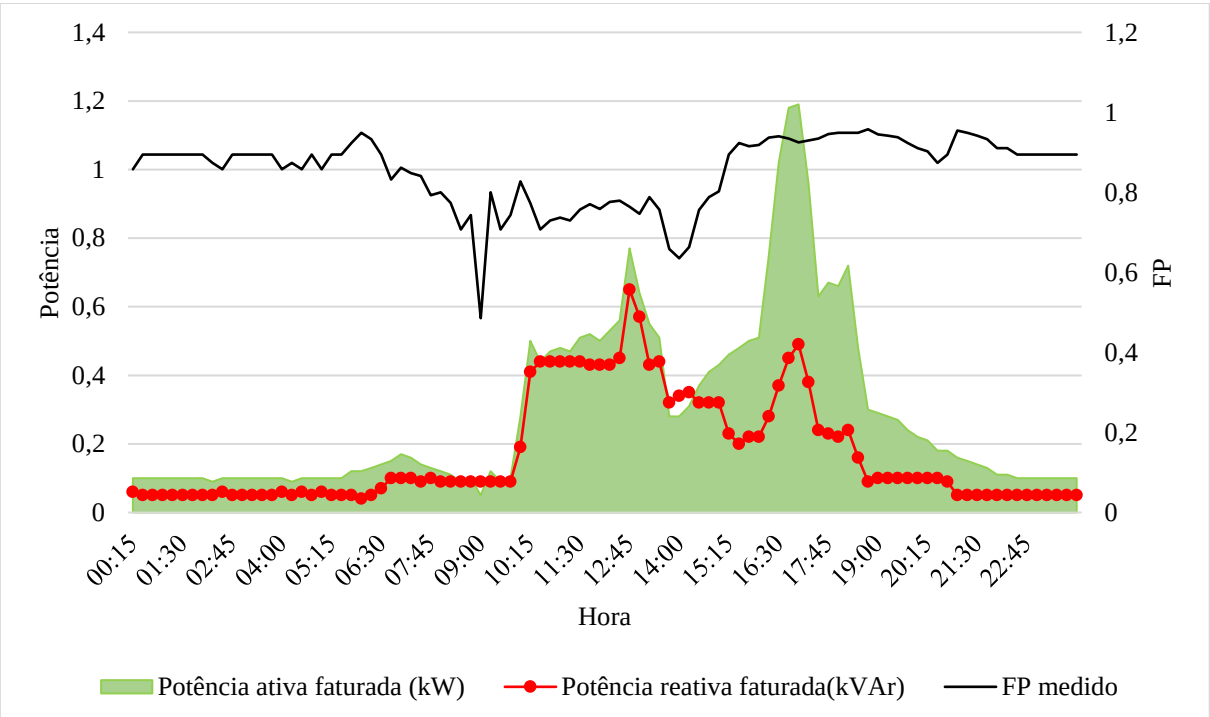
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 75 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 3º dia.



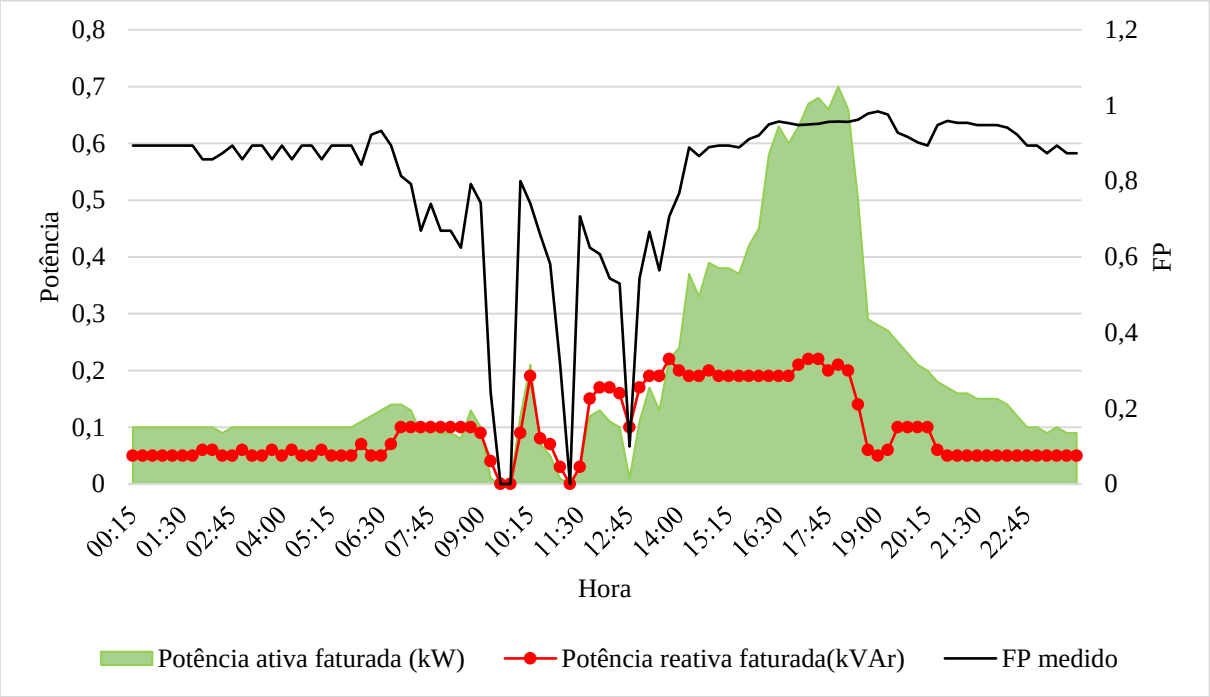
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 76 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 4º dia.



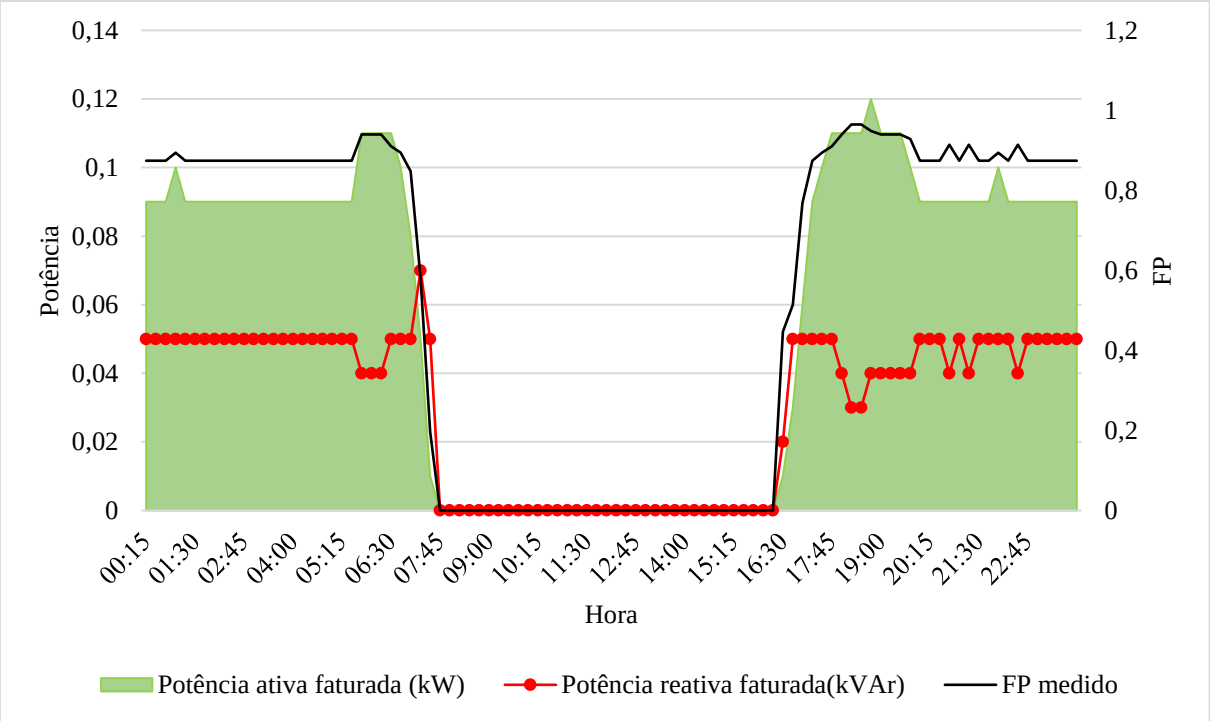
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 77 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 5º dia.



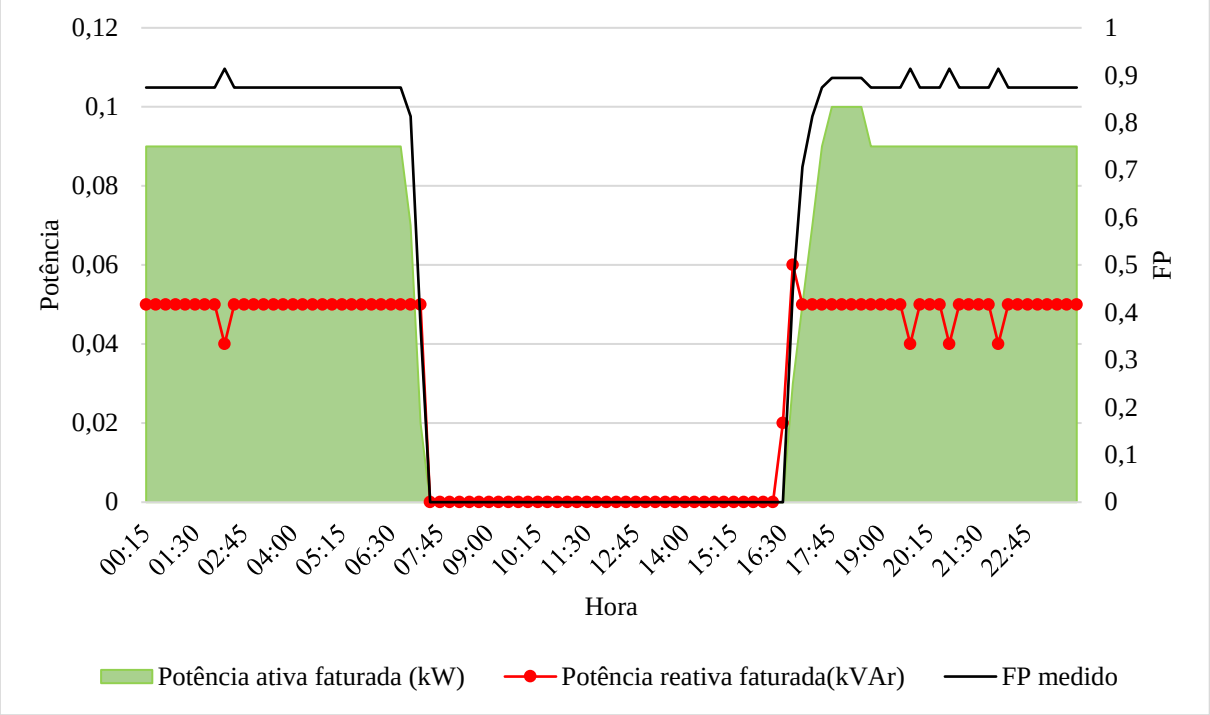
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 78 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 6º dia.



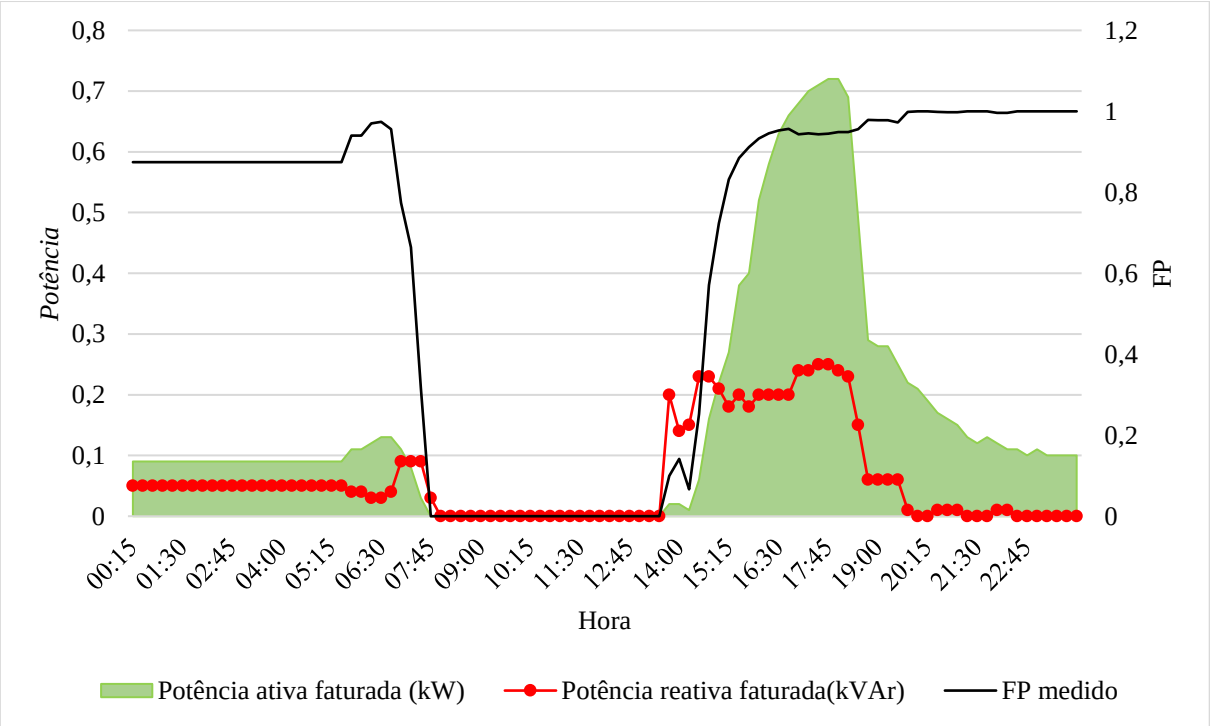
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 79 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 7º dia.



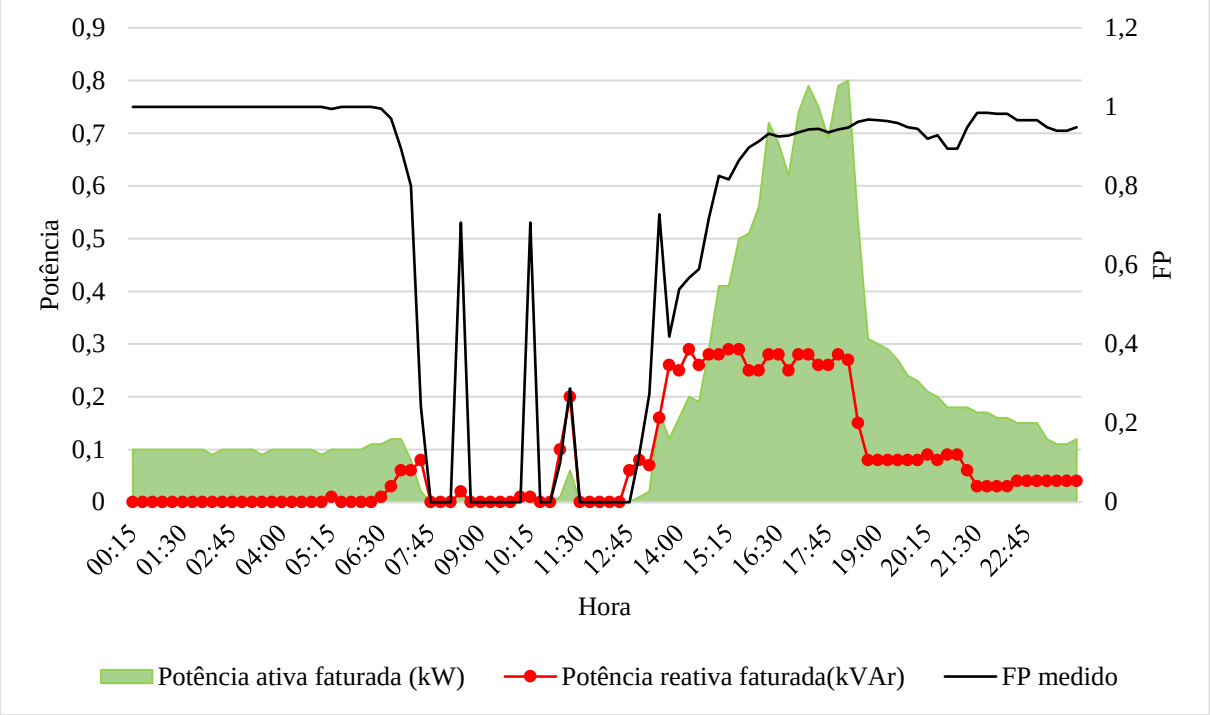
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 80 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 8º dia.



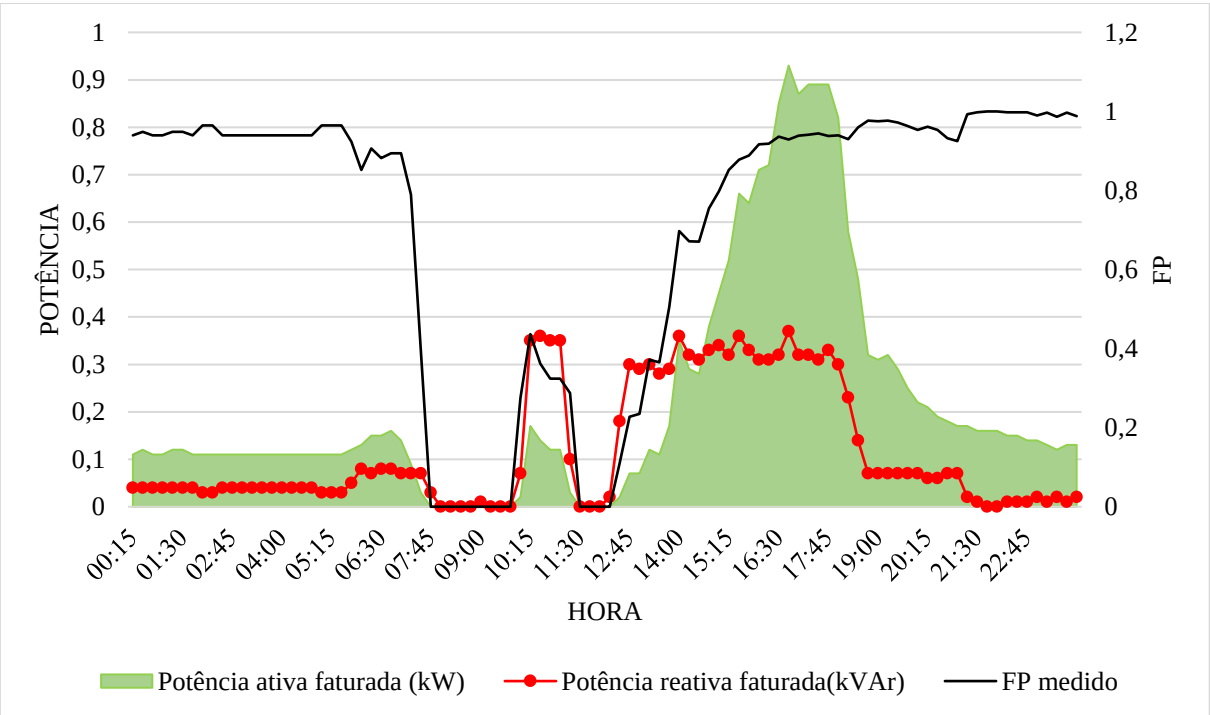
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 81 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 9º dia.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 82 – Perfil de operação da unidade consumidora com GDFV – 10º dia.

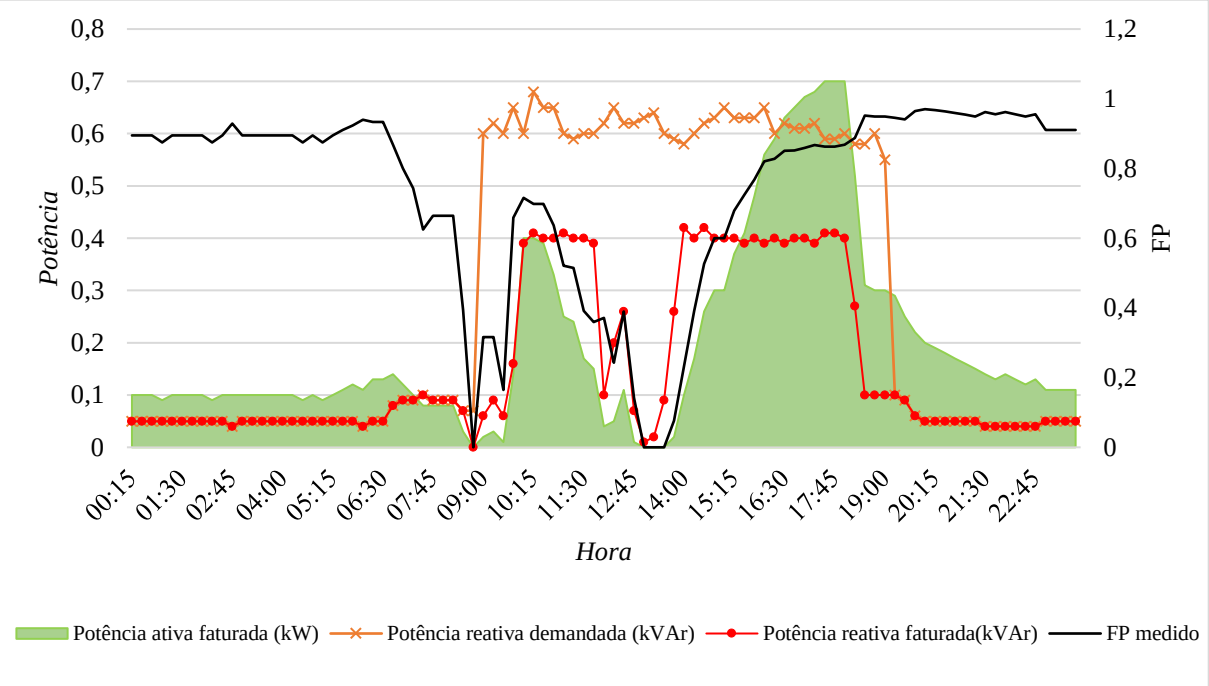


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verificou-se que o faturamento de potência reativa e o fator de potência medidos diminuem à medida que a demanda de potência ativa da rede diminui conforme previsto em (13) e (14). Logo, o faturamento de potência reativa não depende apenas do valor do fator de potência conforme (3). Tal afirmação pode ser vista com mais clareza nas Figura 78 e 79 nos 6º e 7º dias, onde o nível do FP chega a 0 no período onde o sistema de GDFV supre totalmente a demanda ativa da unidade. Nesse período não existe faturamento por violação do FP. Contudo, a unidade consumidora continua a demandar potência reativa da rede, não sendo faturada por isso. Vale ressaltar que a unidade é faturada quando a violação de nível do FP ocorre no período em que existe consumo de potência ativa, sendo críticos os períodos de interseção entre o consumo e a geração.

Na Figura 83 é ilustrado um perfil de funcionamento típico da unidade consumidora em um dia útil com o sistema de GDFV em funcionamento.

Figura 83 – Perfil de operação típico da unidade consumidora com GDFV (dia útil).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verifica-se que a demanda de potência reativa da rede permanece inalterada, ficando sob a responsabilidade da concessionária suprir tal demanda, uma vez que o faturamento não abrange todo o quantitativo demandado. Um ponto crítico para a rede se dá no período onde o sistema de GD supre totalmente a carga com potência ativa com a cobrança de potência reativa sendo nula. Não se pode ignorar que este efeito agrava-se uma vez que os picos de demanda de potência reativa da unidade analisada coincidem com o pico da geração

fotovoltaica, o que agrava os efeitos sobre a rede. Tal situação demonstra a necessidade de atualização nos modos de medição, bem como alteração dos regulamentos e normas aplicáveis.

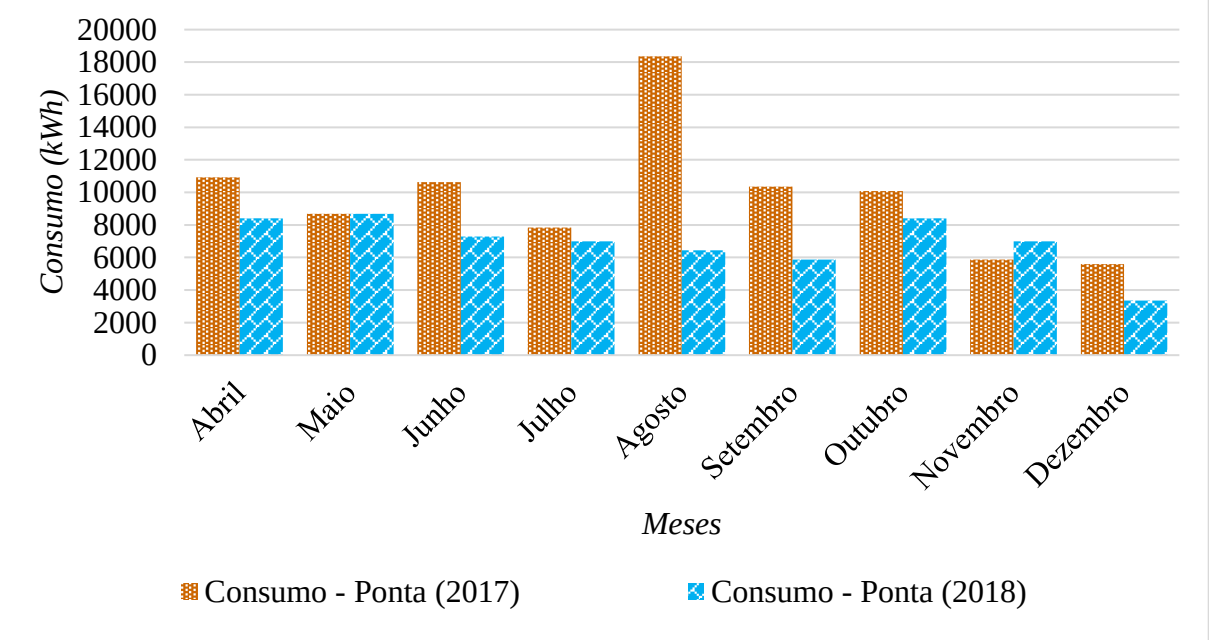
5.3 COMPARATIVO DE ECONOMIA

Como forma de aferir a economia no consumo de energia em valores reais, foi realizada a comparação dos consumos divididos em consumo de ponta e fora ponta, bem como do valor faturado no mês em relação ao mesmo mês do ano anterior. Isso foi possível uma vez que não houve mudança significativa da carga instalada no decorrer do período.

5.3.1 Comportamento do Faturamento no Consumo de Energia

Na Figura 84 é ilustrado o comparativo mês a mês do consumo de energia no horário de ponta no ano de 2018 em relação ao mesmo mês do ano de 2017.

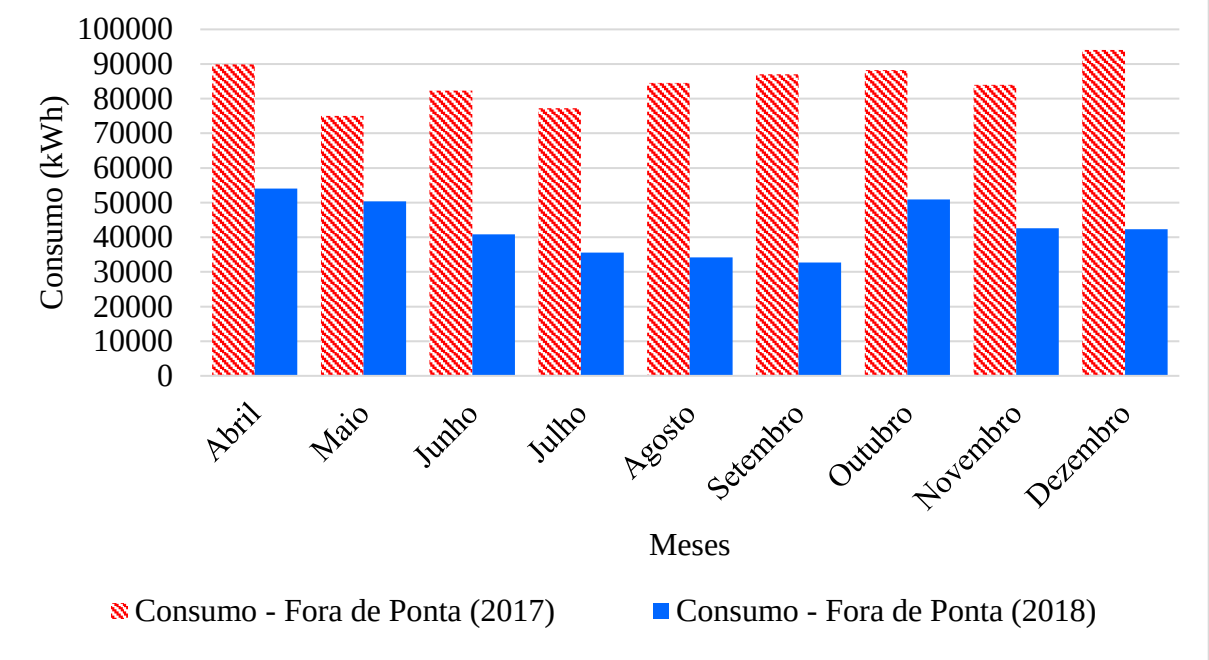
Figura 84 – Comparativo de consumo de energia elétrica no horário de ponta.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verificou-se uma pequena redução no consumo médio no horário de ponta. Tal comportamento encontra-se dentro do esperado uma vez que, em geral, o início do horário de ponta coincide com o término do período de geração fotovoltaica. A Figura 85 apresenta o comparativo mês a mês do consumo de energia no horário fora ponta no ano de 2018 em relação ao mesmo mês do ano de 2017.

Figura 85 – Comparativo de consumo de energia elétrica no horário de fora de ponta.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nesta situação foi verificada uma redução considerável no consumo de energia no horário fora de ponta. Tal redução encontra explicação no fato de que o período de geração fotovoltaica está dentro do período de maior demanda de consumo de energia na unidade. Na Tabela 6 é apresentado o comparativo de redução total no consumo de energia e o percentual de redução.

Tabela 6 – Comparativo de economia de consumo de energia no período.

Descrição	**Total de consumo (kWh)**	**Percentual de redução**
Consumo Ponta – sem GDFV (2017)	88.368	**29,34%**
Consumo Ponta – com GDFV (2018)	62.440	
Consumo Fora de Ponta – sem GDFV (2017)	762.440	**49,69%**
Consumo Fora de Ponta – com GDFV (2018)	383.600	

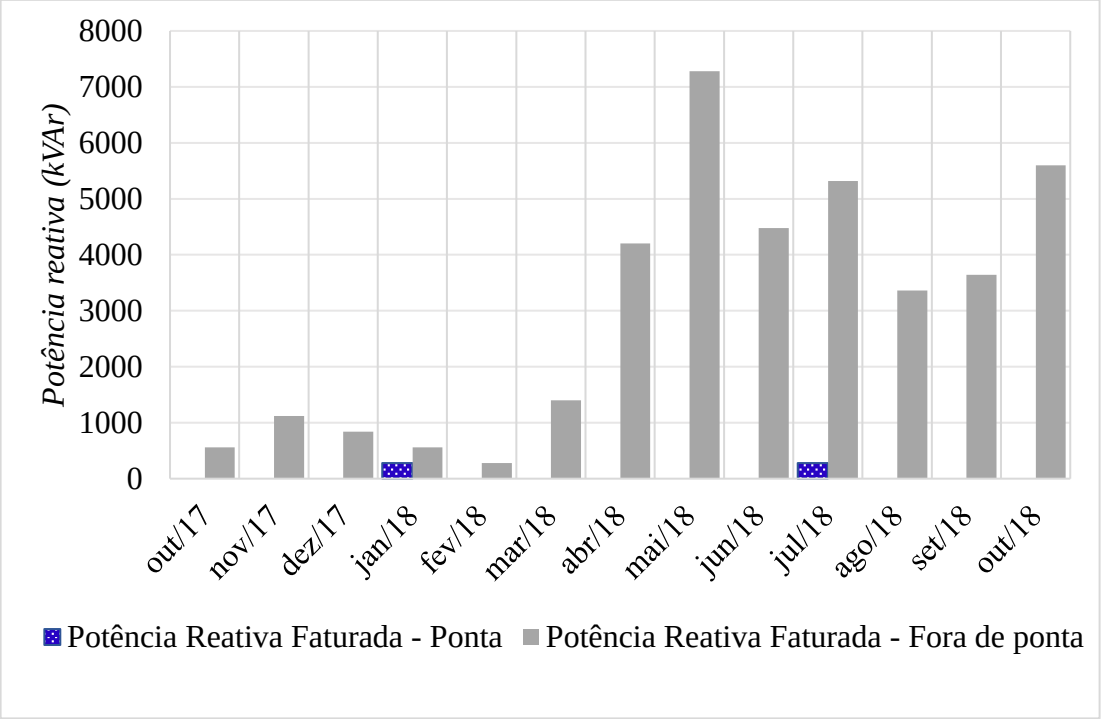
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi possível verificar um maior percentual de redução do consumo de energia no período fora ponta quando comparado ao mesmo período do ano anterior, chegando a uma economia de 49,69% no período analisado.

5.3.2 Comportamento do Faturamento de Potência Reativa

No item anterior foi verificada uma redução considerável no consumo de energia da unidade. Neste item foi verificado o comportamento do faturamento de potência reativa da unidade com o objetivo de aferir os quantitativos faturados. Na Figura 86 é ilustrado o comportamento da energia reativa faturada no período de um ano.

Figura 86 – Energia reativa faturada no período.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

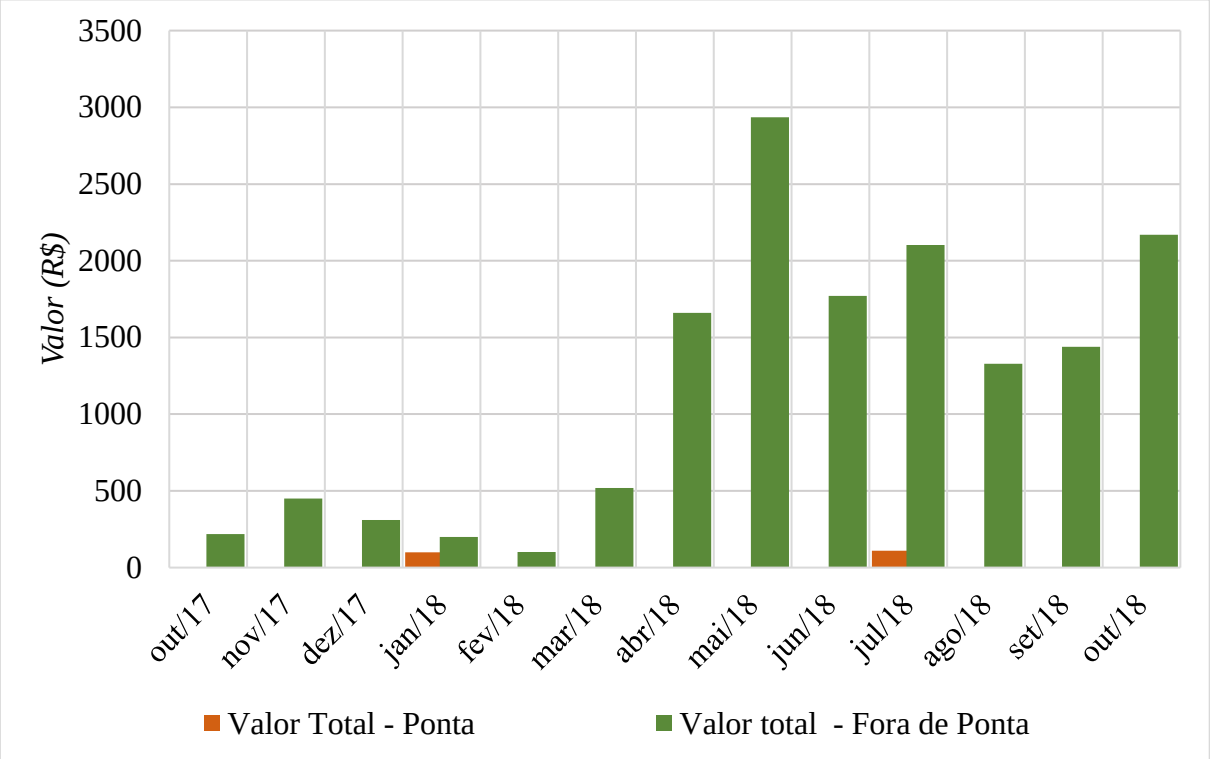
Foi verificado uma elevação média de 757,14% no faturamento de potência reativa a partir do mês de Abril de 2018, comportamento que coincide com o período da entrada em operação do sistema de GDFV.

5.3.3 Comparativo Financeiro

Uma vez mostrado o comportamento no faturamento do consumo de energia e da energia reativa da unidade foram avaliados os impactos financeiros decorrentes desses

comportamentos. São ilustrados na Figura 87 os valores faturados com potência reativa no período.

Figura 87 – Valores faturados sobre a energia reativa no período.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como esperado ocorreu uma elevação no valor faturado da potência reativa a partir do mês Abril de 2018. Na Tabela 7 é apresentada a elevação percentual média do faturamento da potência reativa da unidade consumidora.

Tabela 7 – Comparativo de valores faturados por energia reativa no período.

Descrição	**Valor**	**Aumento percentual**
Valor médio (Fora de Ponta) – sem GDFV	R$ 300,07	**638,21%**
Valor médio (Fora de Ponta) – com GDFV	R$ 1.915,04	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verificado o aumento percentual no valor faturado da potência reativa, será verificada a participação percentual do valor da potência reativa sobre a fatura de energia da unidade. Na Tabela 8 é apresentada a participação do valor da energia reativa na fatura de energia.

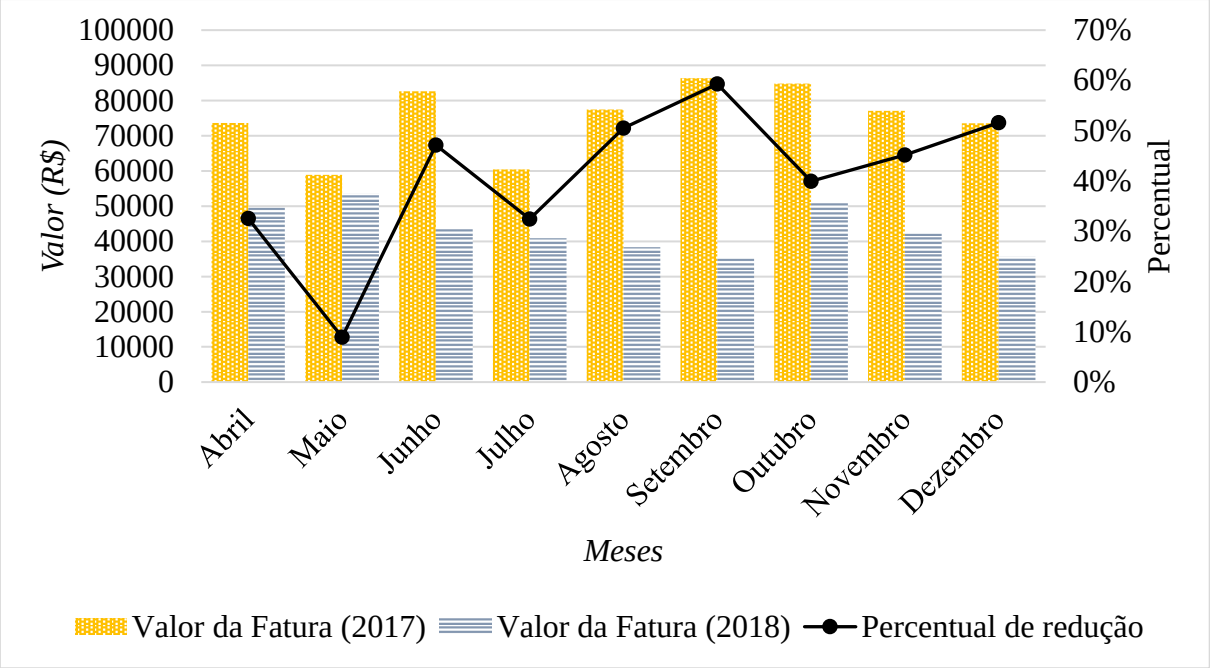
Tabela 8 – Participação do valor da energia reativa na fatura de energia.

Descrição	Valor médio (fatura de energia)	Valor médio (Potência reativa)	Percentual de participação
Valores faturados – sem GDFV	R$ 74.980,95	R$ 300,07	**0,4%**
Valores faturados – com GDFV	R$43.342,17	R$ 1.915,04	**4,42%**

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Uma vez verificados os impactos financeiros ligados à potência reativa, foram verificados os impactos na fatura de energia da unidade. Com este objetivo é apresentado na Figura 88 o comparativo mês a mês dos valores das faturas do ano de 2018 em relação ao mesmo mês do ano de 2017.

Figura 88 – Comparativo de variação de valores faturados 2017-2018.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a inserção da GDFV ocorreu redução nos valores das faturas de energia no ano de 2018 quando comparado ao mesmo mês do ano de 2017, chegando a alcançar uma redução de 59% no mês de setembro que pode vir a justificar a utilização do sistema. Na Tabela 9 é apresentada a redução do valor faturado na unidade consumidora.

Tabela 9 – Comparativo de economia no período.

Descrição	Valor total (R$)	Percentual de redução
Custo da energia no período (2017) – sem GDFV	674.826,52	**42,20%**
Custo da energia no período (2018) – com GDFV	390.079,54	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Verifica-se que ocorreu uma redução total no período da ordem de 42,2% no valor cobrado na fatura de energia. Tal percentual de redução é menor que os apresentados em unidades do grupo B, uma vez que na unidade em estudo a potência do sistema de GDFV é limitada, por força de regulamentação, à demanda contratada.

5.3.4 Custos do sistema e previsão de retorno do investimento

Para a implantação do sistema são considerados os custos com projetos, aquisição dos equipamentos e mão de obra para instalação. Somados todos esses custos obteve-se que o valor do investimento realizado foi de R$ 2.183.000,00 (dois milhões cento e oitenta e três mil reais). Após o início do funcionamento da GDFV foi realizada a comparação por um período de 9 meses, onde obteve-se um valor médio de economia mensal no período comparado de R$ 31.638,55 (trinta e um mil, seiscentos e trinta e oito reais e cinquenta e cinco centavos). De modo simplificado e desconsiderando os custos com manutenções periódicas e a diminuição de performance dos módulos tem-se que o tempo de retorno do investimento será de aproximadamente 69 meses (5 anos e 9 meses).

5.4 CORREÇÕES OU MELHORAMENTOS

São apresentadas algumas sugestões como forma de melhorar os índices de fator de potência da unidade, bem como são realizadas breves discussões referentes à implantação das sugestões propostas.

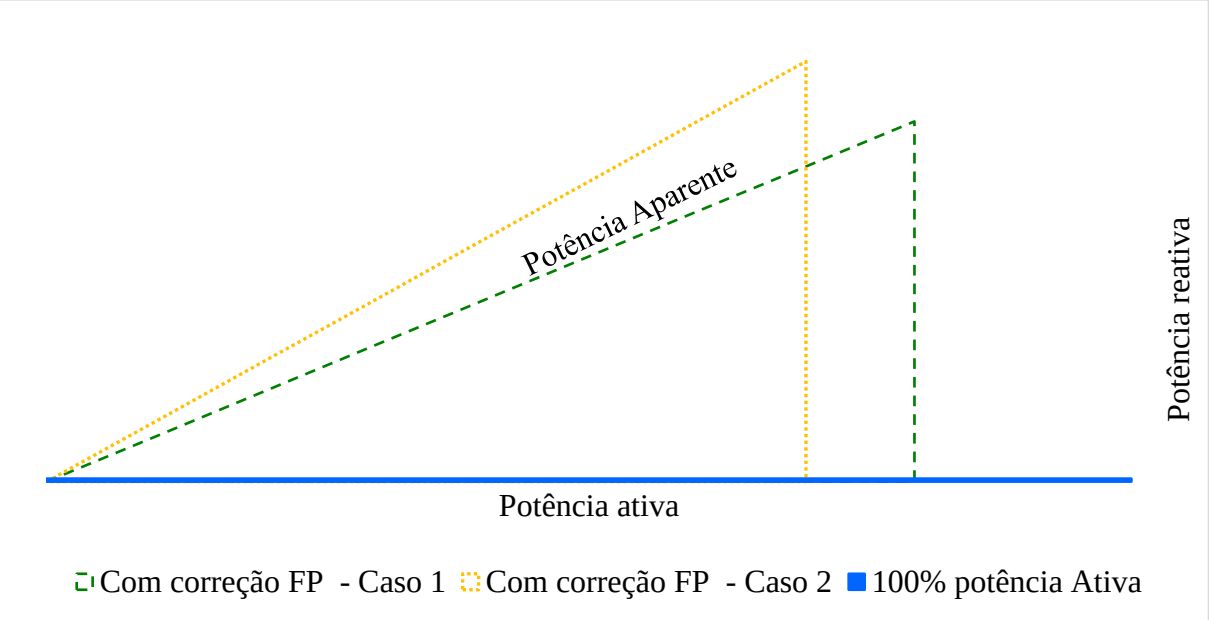
5.4.1 Compensação de reativos pelo inversor

Uma das sugestões que se apresenta para a correção dos índices de fator de potência é a utilização do inversor para a manutenção do índice dentro do que prevê o regulamento. Isso

seria possível com a utilização da função de controle Volt/Var já presentes nos inversores utilizados em GDFV (JAHANGIRI, 2013; RAFA, 2008). Entretanto, essa sugestão encontra barreira na legislação brasileira atual que não permite ações desse tipo na GDFV.

Outra barreira refere-se à potência aparente nominal do inversor. A utilização desse equipamento para a correção do fator de potência acarretará num menor fornecimento de potência ativa nos períodos de máxima geração solar fotovoltaica. Na Figura 89 são ilustrados os efeitos da correção do fator de potência pelo inversor na condição de potência nominal.

Figura 89 – Efeitos da correção do fator de potência pelo inversor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Considerando que o inversor esteja operando na condição de potência nominal e uma vez que sendo necessária a atuação na compensação de potência reativa, este contribuirá com um nível e potência ativa menor, conforme observa-se na Figura 89. Uma forma de solucionar esta questão seria a utilização de inversor com potência nominal superior a capacidade de geração do conjunto de módulos. No entanto, alterações no sistema normativo devem ser realizadas uma vez que a legislação atual não permite tal ação. Outra mudança pertinente na legislação seria a de permitir a correção do fator de potência pelo inversor, bem como limitar a injeção dos excedentes ativos na rede ou alterar a forma de compensação vigente, objetivando reduzir ou impactos técnicos e financeiros para as concessionárias de energia. No entanto, os benefícios gerados na rede de energia, pela adoção dessas medidas, serão traduzidos em custos adicionais para o consumidor que opte pela instalação de um sistema de GDFV, fato que deve ser ponderado no estudo para implementação.

5.4.2 Compensação de reativos com banco de capacitores

A compensação de reativos utilizando banco de capacitores é uma forma já consolidada em sistemas de energia. Os bancos de capacitores são dispositivos dedicados à correção do fator de potência indutivo em instalações elétricas, sendo constituídos pela associação de um conjunto de células capacitivas. No caso em estudo, uma sugestão é a instalação de um banco de capacitores automático, composto por um conjunto de células capacitivas e um controlador responsável pela atuação do banco de forma total ou parcial. Tal proposta faz-se necessária devido às características de intermitência da geração fotovoltaica, o que afeta diretamente os níveis do fator de potência.

6 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

São grandes os desafios para atenuar os efeitos negativos que acompanham a inserção em larga escala de sistemas de GDFV na rede de distribuição. Contudo, não se pode negar que a presença de tal forma de geração traz benefícios para o sistema elétrico, uma vez que contribui para aumentar o nível da segurança energética do país.

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Pelo exposto, verifica-se que a Resolução nº 482/2012 que regulamenta sistemas de compensação de energia elétrica, apresenta deficiência quando a unidade com GD encontra-se sujeita a cobrança por violação de reativos, como foi possível verificar nos modos de operação 1, 2 e 3, onde aparecem quedas do fator de potência, havendo tarifação de excedente de reativos.

Desta maneira, a tarifação de reativos poderia tornar o sistema de GD menos atrativo para essa unidade o que, de certo modo, faz com que o crescimento da geração distribuída seja reduzido, uma vez que os sistemas de GD nas unidades analisadas possuem maior potência instalada em comparação aos sistemas residenciais.

Nos modos de operação 4, 5 e 6 a demanda reativa é compensada pelo inversor, contudo o responsável pela GD encontrará um dilema pois, nos períodos em que o sistema fotovoltaico apresentar a máxima geração, esse deverá escolher em operar com inversor corrigindo fator de potência, logo, injetando menos potência ativa ou com fator de potência unitário entregando o máximo de potência ativa e arcando com a cobrança de excedente de reativos. Qualquer das situações escolhidas não será a que engloba todos os aspectos técnicos e econômicos.

Vale ressaltar que a cobrança do ICMS sobre a energia gerada para a GD com potência superior a 1MW poderá se tornar mais uma barreira para instalação desse tipo de geração por esses consumidores.

Dessa forma, este trabalho se faz importante para ressaltar os impactos dos sistemas de GDFV em consumidores do grupo A. Nos resultados encontrados fica demonstrada a viabilidade econômica da implantação do sistema, uma vez que ocorre uma diminuição da energia ativa faturada. No entanto, não se pode esquecer que o valor faturado sobre a energia reativa sofreu uma elevação de 638,21%. Neste sentido, há certa desvantagem, pois, parte da economia em energia é contrabalanceada pela tarifação por excedente reativo. Portanto, para

um melhor aproveitamento do sistema de GDFV, tais excedentes devem ser compensados de forma eficiente. Vale ressaltar que uma vez corrigido o fator de potência, a economia média saltaria dos atuais R$ 31.638,55 para R$ 33.553,59.

Por fim, aflora a necessidade de reformulação das legislações em vigor, objetivando causar maior atratividade para a adesão aos sistemas de GD nas unidades analisadas, bem como mitigar os efeitos negativos da inserção massiva dos sistema de GDFV.

6.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE

1. Uma proposta para alteração da legislação aplicadas a GDFV no Brasil.
2. Estudo da estabilidade do sistema de distribuição devido a inserção massiva de GDFV.
3. Uma análise técnico-financeira de GDFV com sistema de armazenamento.

REFERÊNCIAS

ACKERMAN, T; GÖRAN, A; SÖDER, L. **Distributed generation**: a definition. Electric Power Systems Research, v.57, p. 195-204, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico Nacional – PRODIST**: módulo 3, acesso ao sistema de distribuição. Revisão 7. Brasília: ANEEL, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Brasília: ANEEL, 2010

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, ANEEL, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº687, de 24 de novembro de 2015**. Brasília: ANEEL, 2015.

ARAÚJO, S.; V.; ZACHARIAS, P.; MALLWITZ, R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 57, n. 9, p. 3118 - 3128, 2010. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5345742. Acesso em: 30 ago. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 16.149/2013:** sistemas fotovoltaicos (FV): características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. **Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015**. Altera a Lei nº 7.689, de 15 de dezembro de 1988, para elevar a alíquota da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido - CSLL em relação às pessoas jurídicas de seguros privados e de capitalização, e às referidas nos incisos I a VII, IX e X do § 1º do art. 1º da Lei Complementar nº 105, de 10 de janeiro de 2001; altera as Leis nº s 9.808, de 20 de julho de 1999, 8.402, de 8 de janeiro de 1992, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 10.833, de 29 de dezembro de 2003, 11.033, de 21 de dezembro de 2004, 12.715, de 17 de setembro de 2012, 9.249, de 26 de dezembro de 1995, 11.484, de 31 de maio de 2007, 12.973, de 13 de maio de 2014, 10.150, de 21 de dezembro de 2000, e 10.865, de 30 de abril de 2004; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13169.htm. Acesso em: 20 fev. 2019.

BRASIL. **Decreto 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm. Acesso em: 15 set. 2019.

CASTRO, N.; CÂMARA, L. **Os desafios associados à difusão da geração distribuída de pequeno porte**. Rio de Janeiro: Brasil Energia, 2017.

CONFAZ. Conselho Nacional de Política Fazendária. **Convênio ICMS nº 16 de 22 de abril de 2015**. Brasília, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional**. 2018. Disponível em: http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018. Acesso em: 18 jan. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional.** 2019. Disponível em: http://www. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/ publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019. Acesso em: 30 nov. 2019.

FALCÃO, D. M. **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica**. IEEE. 2013. Disponível em: http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf. Acesso em: 15 maio 2019.

FORTES, R. R. A. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/138262. Acesso em: 26 jul. 2018.

FORTES, R. R. A. **Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída**. 2018. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/180210. Acesso em: 20 jul. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011**. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf. Acesso em: 15 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Portaria n.º 357, de 01 de agosto de 2014.** Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002145.pdf. Acesso em: 15 jan. 2019.

JAHANGIRI, P.; ALIPRANTIS, D, C. Distributed Volt/VAr control by PV inverters. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 3. p. 3429-3439. 2103.

LEITE, M. C. C.; VIEIRA, F. A. M.; SILVA, V. B.; FORTES, M. Z.; DIAS, D. H. N. Harmonic analysis of a photovoltaic systems connected to low voltage grid. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 16, n. 1, p. 112-117, 2018.

MALLWITZ, R.; ENGEL, B. Solar power inverters: SMA solar technology AG. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED POWER ELECTRONICS SYSTEMS – CIPS, 6, 2010, Nuremberg. **Proceedings of the** [...]. Nuremberg: [s.n.], Germany, 2010. Paper 6.2. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5730644. Acesso em: 20 jul 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Plano nacional de energia 2030**. 2007. Disponível em: http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030. Acesso em: 28 jun. 2018.

NEWSHAM, Guy R.; BOWKER, Brent G. The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: areview. **Energy Policy**, Surrey, v. 38, p. 3289–3296, 2010.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014. CEPEL/CRESESB.

PRIEB, C. W. M. **Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/55460. Acesso em: 20 ago 2018.

RAFA, A. H.; LARA-ANAYA, O.; MCDONALD, L. R. Power factor control for inverter-interfaced microgeneration. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 43, 2008, Padova. **Proceedings of the** […]. Padova: , 2008

SIQUEIRA, J. C.; BATISTA, E. A.; GOMEZ, R. C.; GODOY, R. B. Medição e análise de fluxo de potência em quatro quadrantes com FPGA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 13, 2014, Guimarães. **Conference of the** […]. Guimarães: [s.n.], 2014. Disponível em: https://copec.eu/congresses/intertech2014/proc/works/95.pdf. Acesso em: 28 jun. 2018.

STIGKA, E. K.; PARAVANTIS, J. A.; MIHALAKAKOU, G. K. Social acceptance of renewable energy sources: a review of contingent valuation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 32, p. 100–106, 2014.

ZILLES, Roberto; MACEDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; DE OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Ed. Oficina de Textos, SP, 2012.

XUE,Y.; CHANG, L.; KJAER, S. B.; BORDONAU, J.; SHIMIZU, T. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Piscataway, v. 19, n. 5, p. 1305-1314, 2004. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1331492/. Acesso em: 20 jul 2018.