

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**Análise de tensão resultante da integração de uma microrrede
com sistema de geração solar na rede de distribuição elétrica**

Daniel Nascimento Vivacqua

PROJETO DE FORMATURA/2012

**PEA 2500 - PROJETO DE FORMATURA DA
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

Análise de tensão resultante da integração de uma microrrede com
sistema de geração solar na rede de distribuição elétrica


Aluno:



Daniel Nascimento Vivacqua

Orientador:

Prof. Dr. Nelson Kagan



São Paulo, Julho de 2012.

Sumário

Lista de Figuras.....	3
1 - Introdução.....	6
1.1 – Fatos relevantes	6
1.2 – Objetivo	12
2 - Motivação	13
2.1 - Características e Crescimento	13
2.2 - Potencial Brasileiro	16
2.3 - Evolução dos Preços e Produção dos Equipamentos.....	18
2.4 - Estudo comparativo dos preços da geração com tarifa atual das distribuidoras.....	21
2.5 - Geração Distribuída GD.....	23
2.5.1 - Benefícios e riscos	25
3 - Características Técnicas e Regulatórias	27
3.1 – Regulatório	27
3.2 - Dimensionamento da área necessária.....	31
3.3 - Células fotovoltaicas.	34
3.3.1 - Construção	35
3.3.2 - Funcionamento	37
3.4 - Tipos de ligação do sistema à rede	43
3.5 - Sistemas Isolados e Sistemas conectados à rede.....	45
3.6 - Inversores.....	45
4 – Análises das Tensões.....	47
4.1 - Modelagem	47
4.2 - Curvas Utilizadas Nas Simulações	49
4.3 - Validação Do Modelo Reduzido	51
4.4 - Influência Do Gerador No Nível De Tensão	58
4.4.1 - Influência do gerador no nível de tensão para carga do tipo corrente constante ..	58
4.4.2 - Influência do gerador no nível de tensão para carga do tipo potência constante ..	62
4.5 - Análise De Representação Da Carga	68
4.6 - Análise das quedas de tensão	69

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

4.7 - Cargas Comerciais E Industriais.....	71
5 - Conclusões	72
5.1 - Trabalhos Futuros	73
6 – Bibliografia.....	74
7 – Anexos	76
8 – Apêndices	77

Lista de Figuras

FIGURA 1- CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR FONTE (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2012).....	6
FIGURA 2 - CONSUMO FINAL ENERGÉTICO POR SETOR 2011 (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2012).....	7
FIGURA 3 - CRESCIMENTO DOS SISTEMAS CONECTADOS A REDE	11
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DE POTÊNCIA INSTALADA FV (REN21 SECRETARIAT, 2012)	14
FIGURA 5 - POTÊNCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA NO MUNDO (REN21 SECRETARIAT, 2012).....	14
FIGURA 6 - BAIRRO SOLAR SCHLIERBERG, EM FRIBURGO, ALEMANHA	15
FIGURA 7 - IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA ANUAL – TERRITÓRIO NACIONAL	17
FIGURA 8 - EVOLUÇÃO DO PREÇO DE SISTEMAS FV NA EUROPA (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012)	19
FIGURA 9 - EVOLUÇÃO DOS PREÇOS NO ATACADO DOS PAINÉIS FV EM 2011 (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012).....	19
FIGURA 10 - PREÇOS UNITÁRIOS DE INVERSORES (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012)	20
FIGURA 11 - EVOLUÇÃO DO PREÇO DO SISTEMA FV COMPLETO AO LONGO DO TEMPO (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012).....	20
FIGURA 12 - PRODUÇÃO MUNDIAL DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS AO LONGO DOS ANOS (ZILLES, 2011).....	21
FIGURA 13 - TARIFA DA DISTRIBUIDORA E CUSTO DE GERAÇÃO FV (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012)	22
FIGURA 14 - TARIFA DA DISTRIBUIDORA E CUSTO DE GERAÇÃO FV COM INCENTIVO NO IMPOSTO DE RENDA (EMPRESA DE PASQUISA ENERGÉTICA, 2012)	23
FIGURA 15 - EXEMPLO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (LOPES, 2007).....	24
FIGURA 16 - PEQUENA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONECTADA À CASA E À REDE	30
FIGURA 17 - RENDIMENTO E ÁREA/KWP PARA CADA MATERIAL. [25]	36
FIGURA 18 - EFICIÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS - NREL	37
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA (CRESESB).....	38
FIGURA 20 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	38
FIGURA 21 - MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	39
FIGURA 22 - CURVA RESULTANTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	40
FIGURA 23 - CURVA DE POTÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA (NOR, SYAFII, & ABDEL-AKHER, 2010)	40
FIGURA 24 - EXEMPLO DE MÓDULO FV EM SÉRIE	42
FIGURA 25 - EXEMPLO DE MÓDULO FV EM PARALELO	43
FIGURA 26 - EXEMPLO DE INSTALAÇÃO DO MEDIDOR - CARGA	43
FIGURA 27 - EXEMPLO DE INSTALAÇÃO DO MEDIDOR - FORNECIMENTO	44
FIGURA 28 - EVOLUÇÃO DOS INVERSORES.....	46
FIGURA 29 - CIRCUITO DO MODELO COMPLETO EM ESTUDO.....	48
FIGURA 30 - CIRCUITO MODELO REDUZIDO	48
FIGURA 31 - RESIDENCIAL - 1MWH/MÊS	49
FIGURA 32 - POTÊNCIA ATIVA DA CARGA - 1MWH/MÊS.....	50
FIGURA 33 - GERADOR FOTOVOLTAICO	50
FIGURA 34 - POTÊNCIA ATIVA RESULTANTE.....	51
FIGURA 35 - MODELO REDUZIDO PARA N = 3.....	52
FIGURA 36 - MODELO COMPLETO N=3.....	53
FIGURA 37 - MODELO REDUZIDO X MODELO COMPLETO PARA N = 3.....	53
FIGURA 38 - MODELO REDUZIDO PARA N = 6.....	54
FIGURA 39 - MODELO COMPLETO PARA N = 6.....	54
FIGURA 40 - MODELO REDUZIDO X MODELO COMPLETO PARA N = 6.....	55
FIGURA 41 - MODELO REDUZIDO PARA N = 10.....	55
FIGURA 42 - MODELO COMPLETO PARA N = 10.....	56

FIGURA 43 - MODELO REDUZIDO X MODELO COMPLETO PARA N = 10.....	56
FIGURA 44 - MODELO COMPLETO PARA N = 10, MEDIÇÃO EM N.....	57
FIGURA 45 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 1.....	59
FIGURA 46 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 5.....	60
FIGURA 47 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 10.....	60
FIGURA 48 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 15.....	61
FIGURA 49 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 20.....	61
FIGURA 50 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 1.....	62
FIGURA 51 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 5.....	63
FIGURA 52 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 10.....	63
FIGURA 53 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 15.....	64
FIGURA 54 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 20.....	64
FIGURA 55 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 1.....	65
FIGURA 56 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 5.....	66
FIGURA 57 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 10.....	66
FIGURA 58 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 15.....	67
FIGURA 59 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 20.....	67
FIGURA 60 - DIFERENTES TIPOS DE CARGA PARA N = 20.....	68
FIGURA 61 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ.....	70
FIGURA 62 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA.....	70
FIGURA 63 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL.....	71
FIGURA 64 - MÉDIA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL BRASILEIRA SAZONALIZADA.....	76
FIGURA 65 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 2.....	77
FIGURA 66 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 3.....	77
FIGURA 67 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 4.....	78
FIGURA 68 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 6.....	78
FIGURA 69 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 7.....	79
FIGURA 70 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 25.....	79
FIGURA 71 - MODELO REDUZIDO, CORRENTE CONSTANTE PARA N = 30.....	80
FIGURA 72 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 2.....	80
FIGURA 73 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 3.....	81
FIGURA 74 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 4.....	81
FIGURA 75 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 6.....	82
FIGURA 76 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 7.....	82
FIGURA 77 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 25.....	83
FIGURA 78 - MODELO REDUZIDO, POTÊNCIA CONSTANTE PARA N = 30.....	83
FIGURA 79 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 2.....	84
FIGURA 80 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 3.....	84
FIGURA 81 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 4.....	85
FIGURA 82 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 6.....	85
FIGURA 83 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 7.....	86
FIGURA 84 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 25.....	86
FIGURA 85 - MODELO REDUZIDO, IMPEDÂNCIA CONSTANTE PARA N = 30.....	87
FIGURA 86 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 6H.....	88
FIGURA 87 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 6H.....	88
FIGURA 88 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 6H.....	89
FIGURA 89 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 7H.....	89

FIGURA 90 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 7H.....	90
FIGURA 91 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 7H.....	90
FIGURA 92 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 8H.....	91
FIGURA 93 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 8H.....	91
FIGURA 94 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 8H.....	92
FIGURA 95 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 9H.....	92
FIGURA 96 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 9H.....	93
FIGURA 97 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 9H.....	93
FIGURA 98 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 10H.....	94
FIGURA 99 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 10H.....	94
FIGURA 100 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 10H.....	95
FIGURA 101 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 11H.....	95
FIGURA 102 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 11H.....	96
FIGURA 103 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 11H.....	96
FIGURA 104 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 13H.....	97
FIGURA 105 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 13H.....	97
FIGURA 106 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 13H.....	98
FIGURA 107 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 14H.....	98
FIGURA 108 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 14H.....	99
FIGURA 109 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 14H.....	99
FIGURA 110 - QUEDA DE TENSÃO NO TRAFÓ ÀS 15H.....	100
FIGURA 111 - QUEDA DE TENSÃO NA LINHA ÀS 15H.....	100
FIGURA 112 - QUEDA DE TENSÃO TOTAL ÀS 15H.....	101

1 - Introdução

1.1 – Fatos relevantes

Percebe-se, no mundo moderno, uma intensa e crescente demanda por energia. Fins básicos como abastecimento de água, alimentação, iluminação, serviços de saúde e transporte necessitam de energia para seu perfeito funcionamento. Essa crescente demanda está intimamente correlacionada ao desenvolvimento humano. (Borges, 2007)

Existem diversas maneiras de se aproveitar a energia que está disponível na natureza, transformando-a em energia útil ao ser humano. O grande paradigma é realizar esta transformação de maneira limpa, barata e sustentável.

O gráfico da figura 1 abaixo mostra as fontes de energia consumidas no ano de 2011 no Brasil.

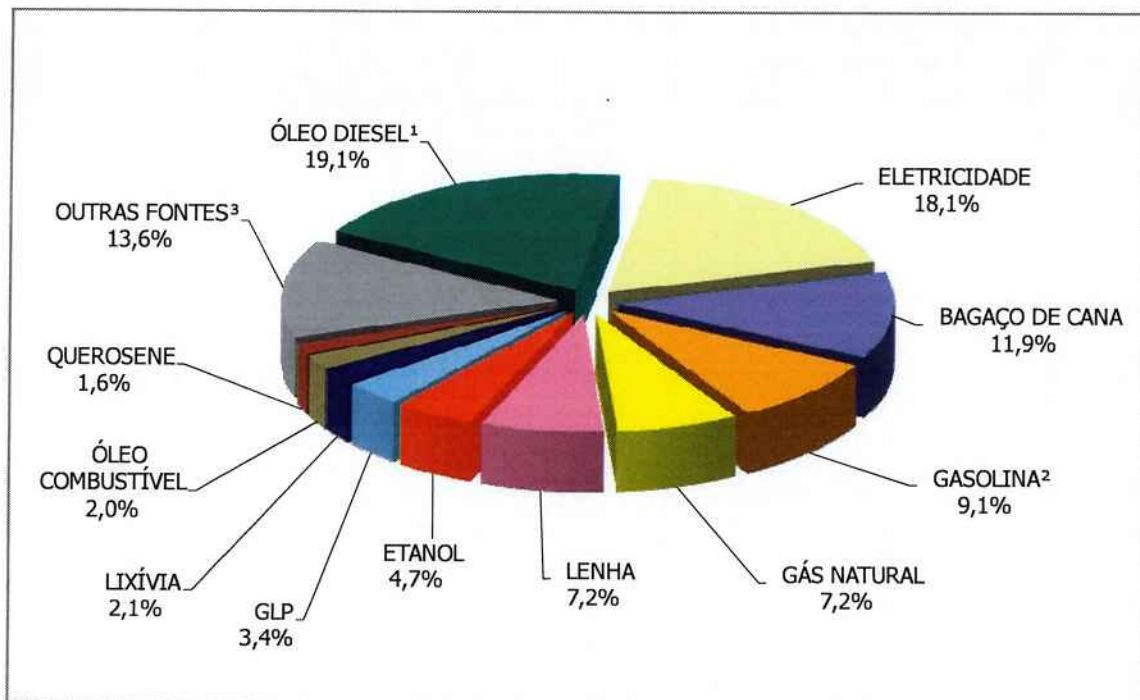


Figura 1- Consumo Final de Energia por Fonte (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2012)

O Brasil que tem tradição na geração de eletricidade baseada em fontes renováveis, através de hidrelétricas, quando analisamos do ponto de vista da energia utilizada para outros fins, 55% dela ainda é proveniente de fontes não renováveis.

No ano de 2011 no Brasil foram consumidos 228.659.000 toneladas equivalentes de petróleo (TEP), uma média de 1,18 toneladas por pessoa, ou 50 GJ de energia por pessoa. Isso significa que em média cada pessoa utilizou 32.700 Kcal por dia. Para comparação, uma pessoa normal necessita em média de 2.000 Kcal retiradas dos alimentos para que seu organismo funcione plenamente. O restante é gasto em transporte, iluminação, processos industriais e perdas nas transformações. (Goldemberg & Lucon, 2007)

O gráfico abaixo ilustra claramente o gasto de energia por setor no Brasil

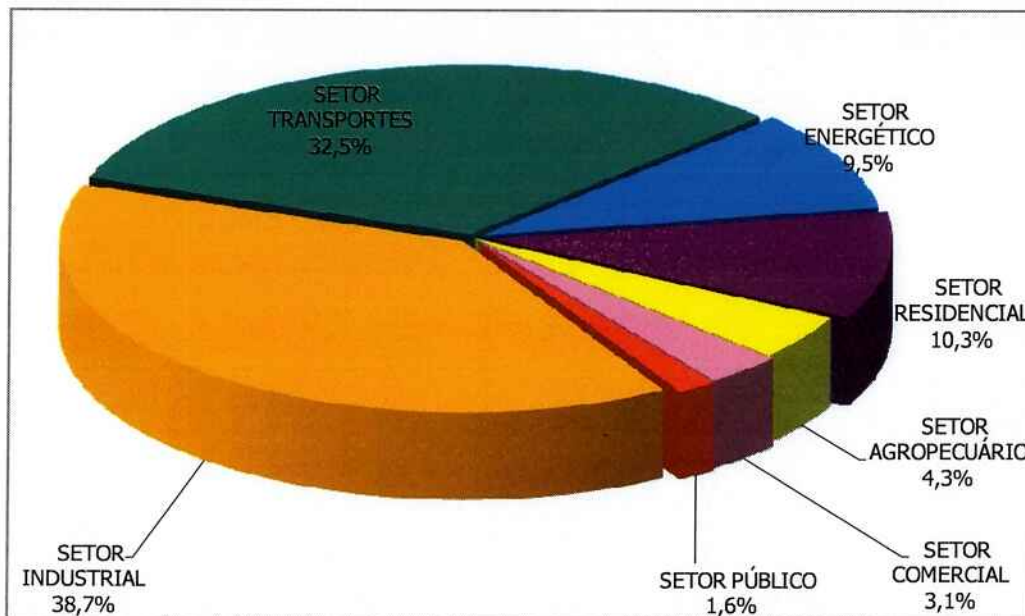


Figura 2 - Consumo Final Energético por Setor 2011 (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2012)

Observa-se no gráfico que o setor de transporte é o segundo maior setor que mais consome, o que corresponde a quase 1/3 do consumo de energia brasileiro. Espera-se que, com a chegada do carro elétrico esse setor reduza consideravelmente a utilização de combustíveis fósseis e passem a utilizar uma energia elétrica gerada por fontes renováveis e menos poluentes.

De acordo com dados preliminares do Balanço Nacional publicado pela EPE o total de emissões causadas por ação humana associada à matriz energética brasileira foi por volta de 395,8 MtCO₂-eq no ano de 2011, sendo só o setor de transporte responsável por cerca de 50% desse valor.

Em comparativo de KgCO₂/U\$\$ de 2011 mostra que a economia brasileira é, em média, cerca de 2 vezes menos intensa em carbono do que a economia americana, 1,4 vezes menos que a economia europeia e 2,8 vezes menos do que a economia chinesa.

Já em termos de emissões por habitante, o comparativo mostra que cada brasileiro é cerca de 4 vezes menos poluente do que um europeu, 9 vezes menos do que um americano e mais de 2 vezes menos poluente do que um chinês.

Já o setor elétrico é relativamente pouco poluente se comparada com as fontes americanas e chinesas que poluem 8 e 12 vezes mais do que o brasileiro, respectivamente. (Empresa de Pesquisas Energéticas, 2012)

Os dados sobre poluição e alterações climáticas são alarmantes, isso faz com que nos preocupemos em encontrar soluções para geração de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis, sustentáveis e limpas. Infelizmente ainda há um número grande de usinas que utilizam combustíveis fósseis, que apesar de apresentarem custos de operação menores, são mais poluentes.

A fim de garantir a oferta de eletricidade para sustentar o crescimento da economia, faz-se necessário um planejamento de longo prazo para a expansão do setor. Atualmente, o governo federal tem investido maior parte de seus recursos na hidroeletricidade e na termoeletricidade a gás natural como solução para aumentar a capacidade instalada do país. No entanto, tendo em vista o impacto ambiental dessas opções, fontes renováveis de pequena escala podem ajudar a compor uma matriz energética limpa e diversificada. Entre elas podemos citar energia eólica, pequenas centrais hidrelétricas e a energia solar.

Faz-se necessário a análise da viabilidade de cada uma das novas tecnologias de geração elétrica, uma vez que cada uma delas tem suas particularidades. Assim é possível identificar qual é a forma mais eficaz e racional de uso dessas alternativas. (De Oliveira, 2002)

A tecnologia solar fotovoltaica tem ganhado destaque por sua facilidade de implantação. O maior entrave para a popularização dessa tecnologia é a questão econômica. Quando comparado à geração hidrelétrica, os custos da fotovoltaica são mais elevados. Porém, não são contabilizados os custos indiretos relacionados à geração, transmissão e distribuição dessa energia. Além disso, se os aspectos ambientais e sociais envolvidos (degradação da qualidade do ar, resíduos radioativos, redução do volume e da quantidade de águas dos rios, destruição de vegetações nativas e florestas por alagamento ou desmatamento, extinção de espécies animais e vegetais e remoção de comunidades) fossem financeiramente quantificados outras formas de geração também seriam inviáveis. (Ramos, 2006)

Nos últimos dez anos, a aplicação dominante da tecnologia passou dos sistemas fotovoltaicos isolados para pequenos geradores conectados à rede, primeiramente a

partir de grandes centrais e, posteriormente, de forma distribuída através de sistemas menores.

Em alguns países da Europa e no Japão, o uso de módulos fotovoltaicos conectados à rede elétrica tem aumentado, principalmente devido a subsídios governamentais e legislação que regulamenta as negociações entre energia excedente produzida e a consumida.

Em países em desenvolvimento, a aplicação mais importante é a de sistemas de geração autônoma para eletrificação rural, destinados à população que não tem acesso à energia elétrica.

No Brasil, essa tecnologia se torna uma solução para viabilizar o Programa Luz para Todos do governo federal, que visa universalizar o acesso à eletricidade, atendendo milhões de brasileiros desde 2003 e teve o projeto estendido para 2014. Uma grande parcela dessa população está domiciliada em áreas rurais muito distantes da rede de distribuição mais próxima, com acesso bastante problemático, como ocorre em diversas comunidades isoladas da Amazônia, ou com restrições legais que impedem a extensão da rede convencional, como no caso de reservas legais. O custo para instalação de linhas de transmissão assim como o impacto ambiental causado são relativamente elevados para a quantidade de energia que se vai transportar e a quantidade de retorno ao investimento que se terá, já que essas áreas, de maneira geral, possuem de baixa densidade demográfica e uma população de baixa renda. Esse cenário torna a instalação de sistemas fotovoltaicos a solução mais viável.

Estima-se que o Brasil possua atualmente 20MWp de capacidade de geração solar fotovoltaica instalada e em sua maioria (99%, segundo IEA 2011) destinadas ao

atendimento de sistemas isolados e remotos. (International Energy Initiative para a América Latina (IEI-LA), 2009) (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

A figura 3 compara os sistemas FV conectados à rede ao longo do tempo.

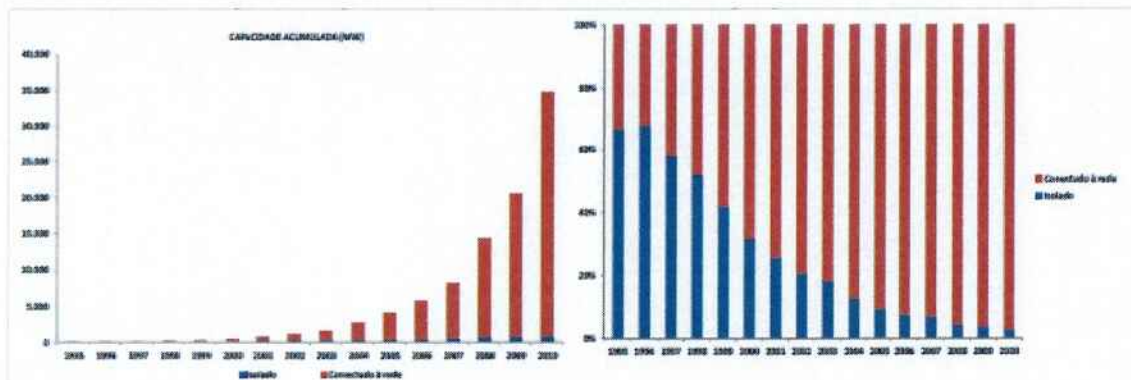


Figura 3 - Crescimento dos Sistemas Conectados a Rede

Os sistemas isolados normalmente utilizam um banco de baterias, que permite a acumulação de energia durante os horários de maior insolação e o uso dessa energia à noite ou em dias menos ensolarados. Mais recentemente, os sistemas solares fotovoltaicos estão sendo utilizados de forma interligada à rede elétrica pública, como pequenos geradores em paralelo às grandes centrais geradoras elétricas convencionais. Desta forma fica dispensado o uso de baterias, já que o sistema injeta na rede o excedente de produção, se houver, e consome energia da rede elétrica nas horas em que não está gerando, integrando no conceito de geração distribuída.

1.2 – Objetivo

Este trabalho tem por objetivo analisar uma microgeração de fonte solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão com o intuito de estudar as influências causadas nas tensões da rede pela inserção de microgerações fotovoltaicas. Para tal objetivo usou-se um programa computacional de cálculo de fluxo de potência e foram estudadas as curvas de demanda de carga e geração fotovoltaica de um sistema genérico modelado. Foram estudados os perfis de tensão ao longo do ciclo de carga diário dos pontos para diferentes tipos de carga, contemplando fluxos bidirecionais. Quanto às simulações, os dados usados para as análises estão parte na dissertação, e a outra parte, sem perda de importância, estará disposta nos apêndices.

Para o maior domínio do assunto e análise de viabilidade, foi feito um breve estudo sobre as fontes de energia, no aspecto brasileiro e mundial, poluição dos sistemas de geração de energia elétrica atuais, crescimento e barateamento de sistemas de geração fotovoltaicos, custos e aspectos técnicos. Serão estudados os trâmites regulatórios com foco em geração distribuída e sistemas fotovoltaicos. Será, também, apresentada uma metodologia de cálculo de área de um sistema fotovoltaico sendo o dado de entrada a energia pretendida mensalmente para o consumidor.

2 - Motivação

2.1 - Características e Crescimento

As grandes motivações de se trabalhar com energia solar são:

- Menor agressão ambiental
- Potencial de crescimento
- Poucos casos estudados e funcionando (comparado com outras fontes)
- Crescimento da população mundial
- Crescimento da demanda por energia
- Busca por uma fonte de energia mais limpa
- Mudanças climáticas e forte ação do homem sobre a natureza
- Custo menor em comparação com uma pequena turbina eólica em pequenas instalações
- Potencial brasileiro de geração e produção de painéis (diversidade climática e riqueza natural)

A discussão de utilizar energia solar não é nova, mas sua necessidade é cada vez mais eminente. Países como Alemanha, Japão e Itália já possuem números elevados de geração solar fotovoltaica. Os EUA e a China, que são os maiores emissores de CO₂ atualmente, têm investido fortemente em energia limpa, com destaque para geração solar fotovoltaica e eólica. (REN21 Secretariat, 2011) (REN21 Secretariat, 2012)

A figura 5 mostra a evolução da potência instalada de energia solar no mundo.

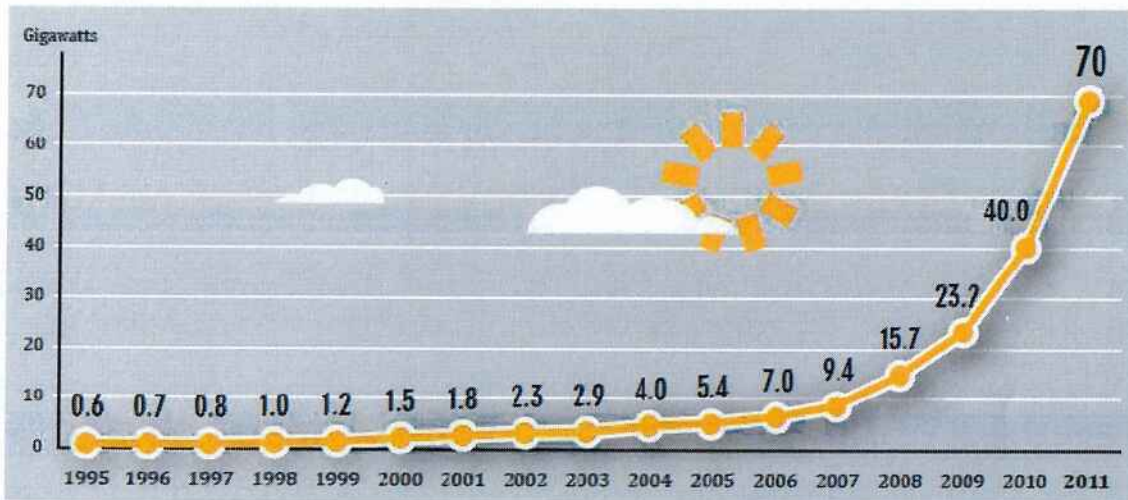


Figura 4 - Evolução de Potência Instalada FV (REN21 Secretariat, 2012)

O crescimento exponencial deve-se à preocupação ambiental, e também a um crescimento sustentável da demanda e do consumo de energia. O gráfico 6 mostra onde estão localizados os 70GW instalados vistos no gráfico anterior.

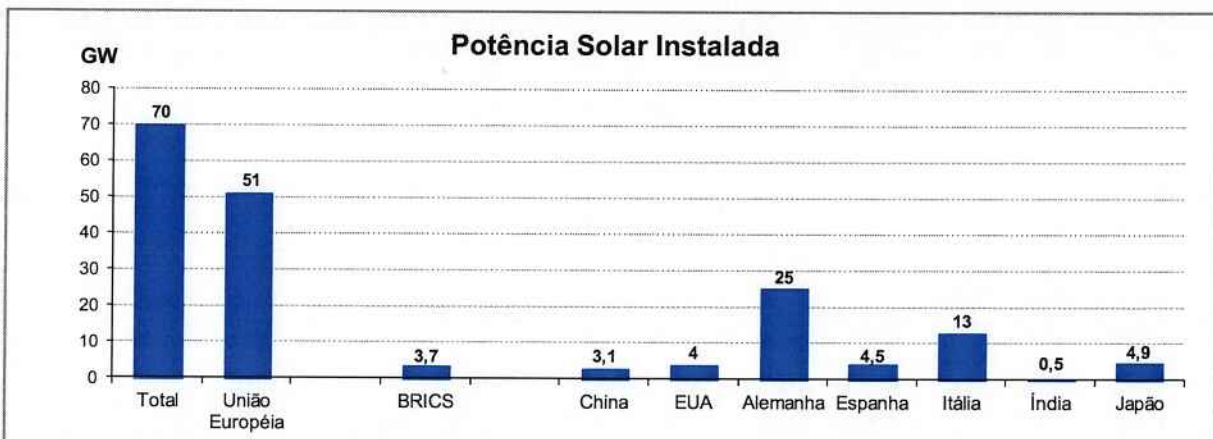


Figura 5 - Potência Fotovoltaica Instalada no Mundo (REN21 Secretariat, 2012)

Através do gráfico da figura 6 é possível comparar a potência fotovoltaica instalada dos países desenvolvidos em relação aos países em desenvolvimento. Nota-se

que a parcela relativa aos BRICS é pequena quando comparada a de países como Alemanha, Itália e Espanha, onde o incentivo a este tipo de geração é elevado. Percebe-se também um atraso por parte dos outros países, uma vez que a União Europeia é detentora de 73% da potência. Em países como a Alemanha, há uma política forte de incentivo governamental e empresarial, levando a criação de bairros inteiros solares, como mostrado na figura abaixo.



Figura 6 - Bairro solar Schlierberg, em Friburgo, Alemanha

2.2 - Potencial Brasileiro

A irradiação solar é a maior fonte de energia que há na terra. O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $5,445 \times 10^{24}$ joules ou $1,15125 \times 10^{18}$ kWh de energia. Comparando com a energia total de produzida em 1970 por todos os sistemas desenvolvidos pelo homem, que foi igual a 2×10^{20} joules ou 0,004% da energia recebida do Sol. Por isso a utilização desta forma de energia é crescente, assim como os estudos e pesquisa na sua utilização. Estudos detalhados sobre a forma de onda incidente, seu comprimento e frequência, assim como a formação de uma base de dados com informações de incidência de determinadas localidades são de grande importância para escolha da localização e previsão de energia gerada. (Zilles, 2011)

Para efeito de comparação com a irradiação europeia, serão analisadas as figuras do atlas brasileiro de energia solar de 2006.



Figura 7 - Irradiação Solar Média Anual – Território Nacional

Na figura 7 é possível observar a média anual de irradiação solar do território nacional. A figura mostra que o território nacional tem boa uniformidade de irradiação, com máximo próximo a fronteira da Bahia com o Piauí, onde o clima é semiárido seco. Já o mínimo é visto no litoral catarinense, onde prevalecem precipitações bem distribuídas ao longo do ano. (Swera, 2006)

O valor apresentado é relativamente alto quando comparado com os países da União Europeia, por exemplo, que mais tem instalações fotovoltaicas no mundo. A irradiação solar no território Alemão está entre a faixa de 900 - 1250 KWh/m², a

Espanha 1200 - 1850 KWh/m² e a França 900 - 1650 KWh/m². Como nota-se na figura, o território brasileiro tem uma faixa de irradiação acentuadamente acima dos locais citados. Isso demonstra a enorme capacidade de geração do território nacional ante ao europeu, onde mais há instalação FV e políticas governamentais para disseminá-las. (Swera, 2006)

O Brasil tem um fator importante que não pode ser desconsiderado, sua forte sazonalização. Apesar disso os mapas mostram que, mesmo com uma boa diferença entre períodos de inverno e verão, o Brasil continua sendo uma ótima opção investimentos e com um elevadíssimo potencial de aproveitamento. [ANEXO 1]

O Brasil, no quesito de energia solar, possui diversas características favoráveis, tais como a insolação já mostrada, além de grandes reservas de quartzo de qualidade, que é uma grande vantagem competitiva na produção de silício com alto grau de pureza. Tais fatores devem atrair investidores e o desenvolvimento de um mercado interno, potencializando a geração FV na matriz elétrica nacional. (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

2.3 - Evolução dos Preços e Produção dos Equipamentos

Assim como a potência instalada cresce exponencialmente, os preços abaixam também rapidamente. A curva de preços desde o ano 2000 da figura Z mostra claramente como a tendência a abaixar mais até ficar com um preço competitivo.

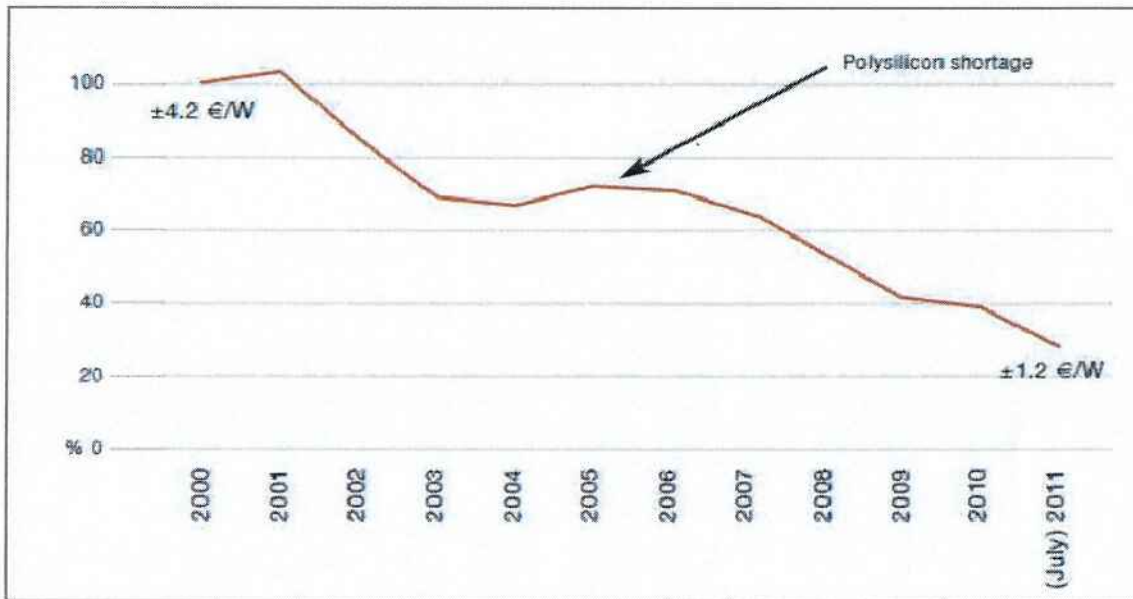


Figura 8 - Evolução do Preço de Sistemas FV na Europa (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

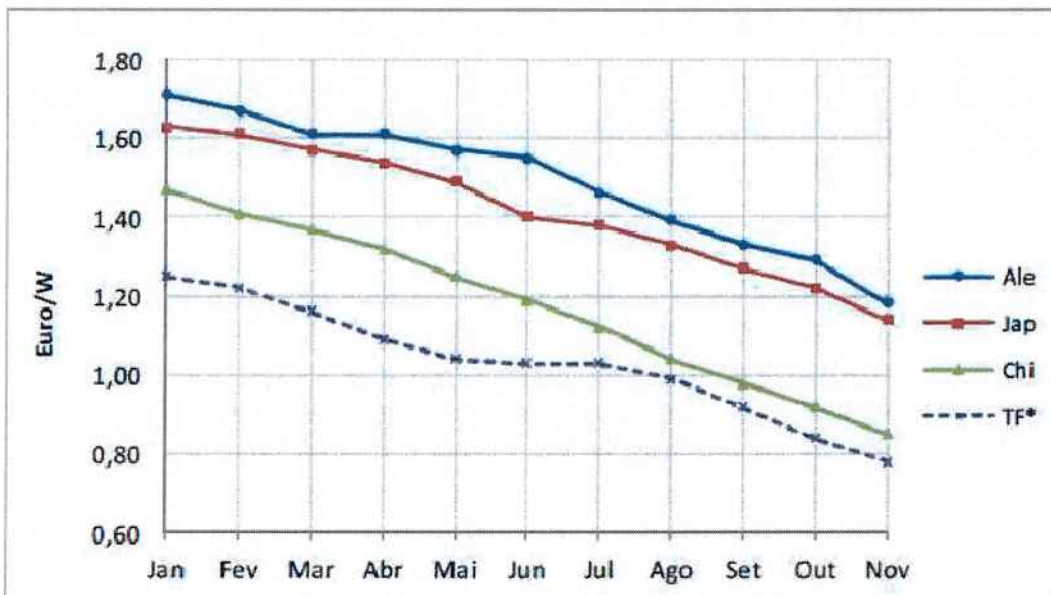


Figura 9 - Evolução dos Preços no Atacado dos Painéis FV em 2011 (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

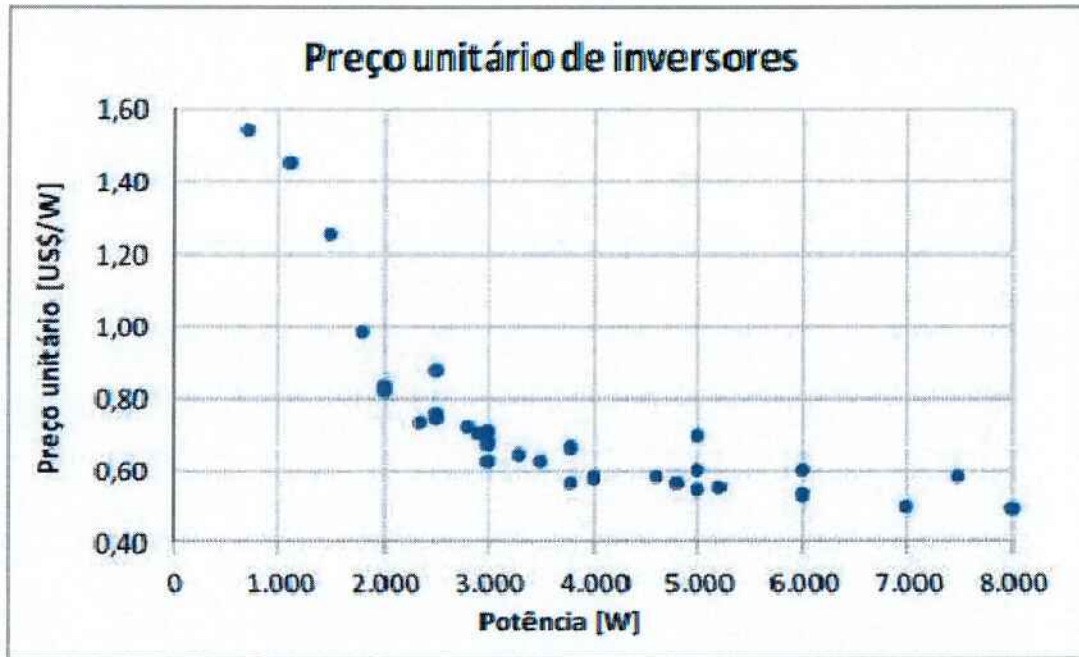


Figura 10 - Preços Unitários de Inversores (Empresa de Pasquisa Energética, 2012)

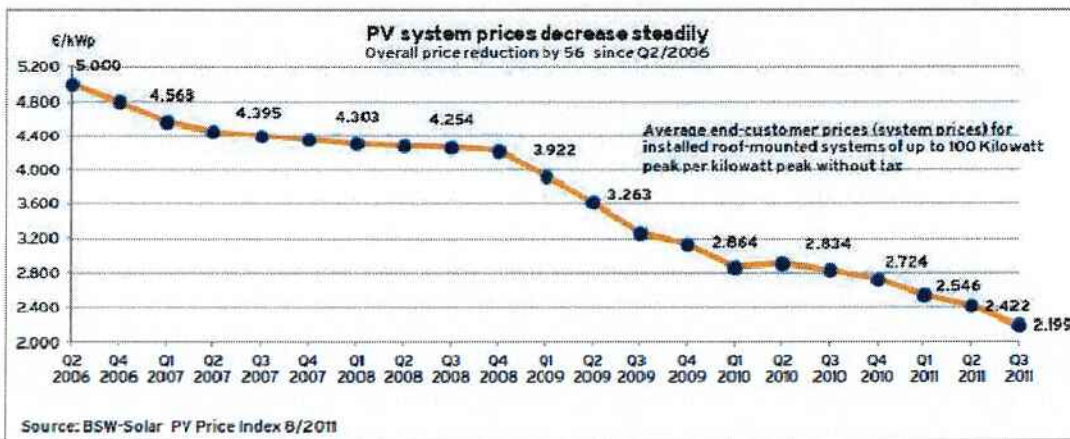


Figura 11 - Evolução do Preço do Sistema FV Completo ao Longo do Tempo (Empresa de Pasquisa Energética, 2012)

Ao contrário da curva de preços, a curva de produção, de módulos cresce exponencialmente, obviamente acompanhando aproximadamente a evolução da potência instalada.

Segue abaixo seu o crescimento da produção mundial de módulos ao longo dos anos:

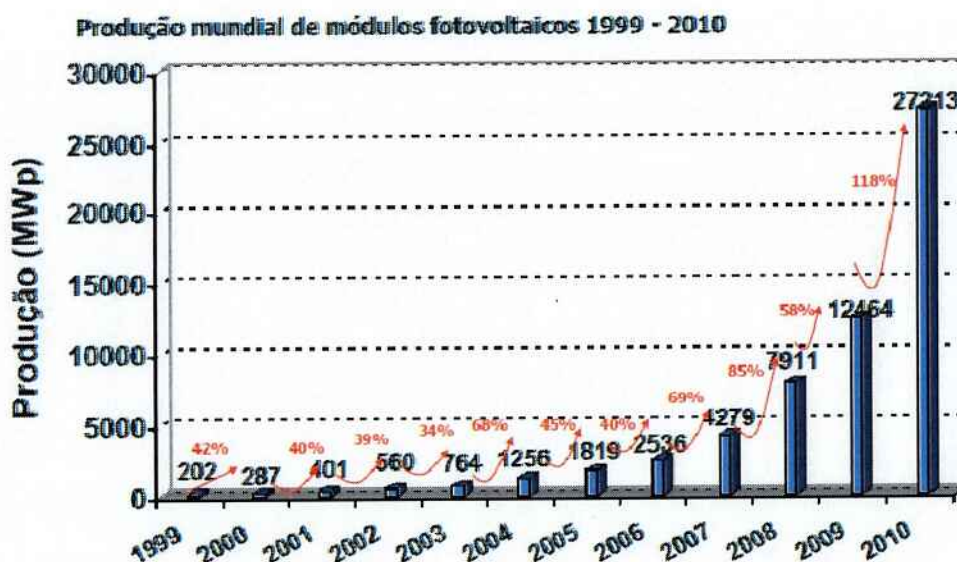


Figura 12 - Produção Mundial de Células Fotovoltaicas ao longo dos anos (Zilles, 2011)

2.4 - Estudo comparativo dos preços da geração com tarifa atual das distribuidoras

No Brasil, uma análise feita pela EPE, divulgada em maio de 2012, estudou o preço da geração fotovoltaica distribuída e fez uma comparação com a tarifa residencial atualmente exercida pelas empresas de distribuição. Na curva pode-se perceber que em certas distribuidoras já é favorável a implantação de painéis FV.

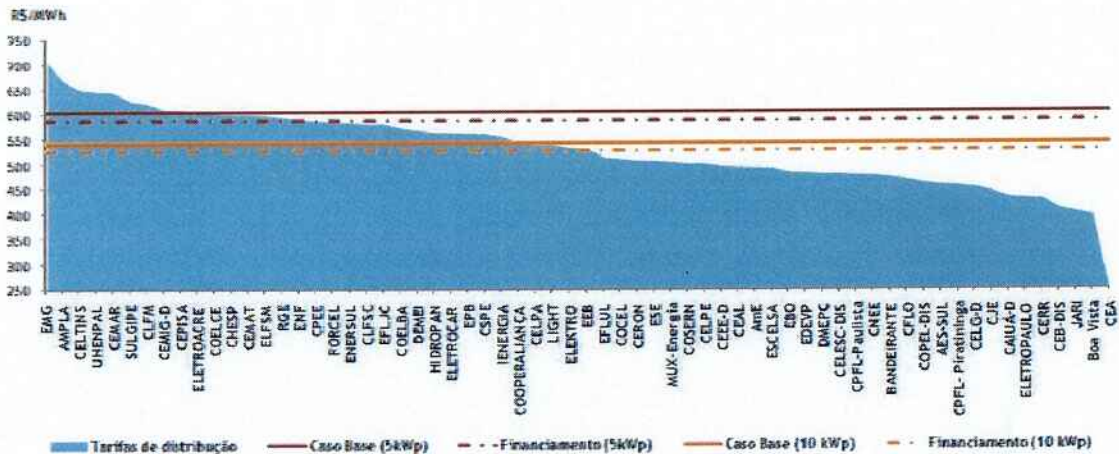


Figura 13 - Tarifa da Distribuidora e Custo de Geração FV (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

Um dos maiores empecilhos para a sua popularização é o altíssimo custo inicial de investimento, com um longo tempo de retorno. Partindo desse pressuposto a EPE simulou a vantagem caso seja possível que consumidores residenciais façam financiamentos para este fim com juros e taxas nominais próximas as já cobradas pelo BNDS para o setor de indústria e comércio. A curva tracejada demonstra uma leve melhora na competitividade com este tipo de financiamento.

Dessa mesma forma a EPE fez outra simulação, mas agora com incentivo no imposto de renda, medidas já adotadas em países como EUA e França. Os resultados obtidos foram ainda mais benéficos aos consumidores. (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

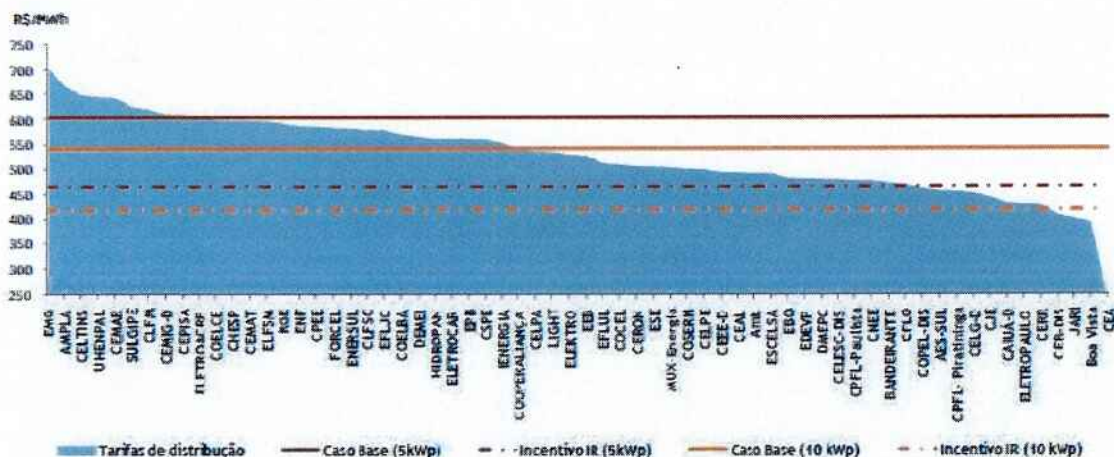


Figura 14 - Tarifa da Distribuidora e Custo de Geração FV com Incentivo no Imposto de Renda (Empresa de Pesquisa Energética, 2012)

Portanto, é possível concluir que a energia solar já está se tornando competitiva se analisada pelo lado da demanda (on demand), porém se analisada pelo lado da geração o custo ainda é muito elevado, inviabilizando negócios de comercialização com essa energia.

2.5 - Geração Distribuída GD

Geração distribuída (GD) é a expressão que designa geração de energia elétrica próxima ou junto aos consumidores, independente da potência, da tecnologia e da fonte de energia usados. Essas unidades de geração, em sua maioria de pequena escala, podem, além de consumir parte da energia gerada, transmitir o excedente à rede. (Instituto Nacional de Eficiência Energética)

Estes são:

- Co-geração;
- Geração cuja fonte são resíduos combustíveis de processo;
- Geração de emergência;
- Geração para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.

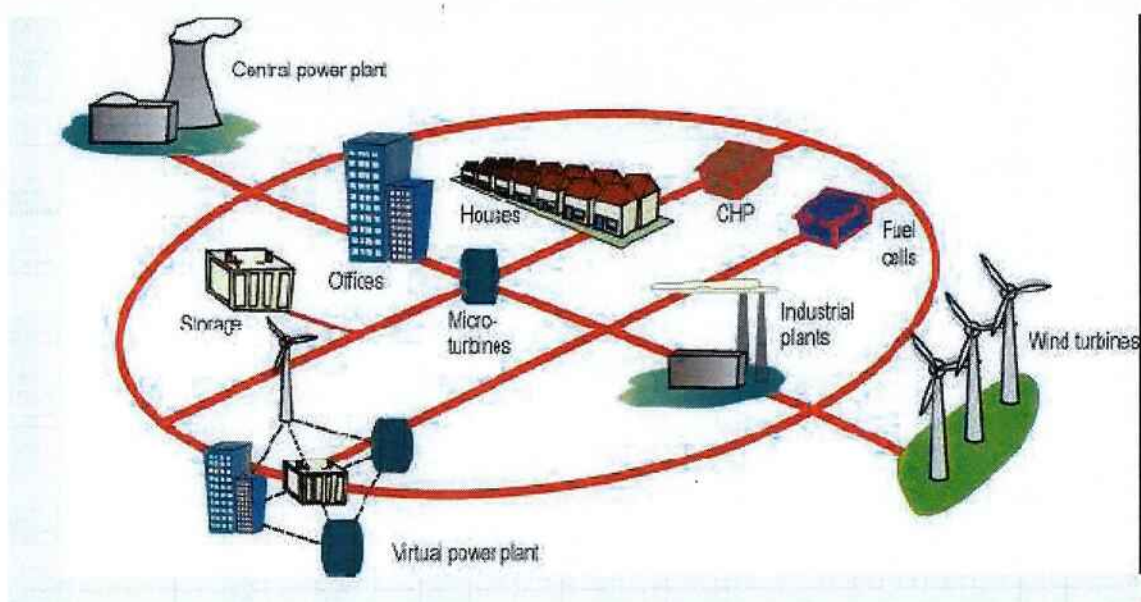


Figura 15 - Exemplo de Geração Distribuída (Lopes, 2007)

2.5.1 - Benefícios e riscos

A instalação de pequenos geradores próximos aos consumidores pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, dentre os quais se destacam: (ANEEL, 2011)

- A postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão;
- O baixo impacto ambiental;
- O menor tempo de implantação;
- A redução no carregamento das redes;
- Melhoramento da estabilidade da rede;
- A redução de perdas, portanto, maior eficiência energética;
- A melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada;
- O provimento de serviços ancilares, como a geração de energia reativa;
- Diversificação da matriz energética.

Há também alguns riscos e desvantagens associadas a essa tecnologia de GD:
(ANEEL, 2011)

- Aumento da complexidade de operação da rede de distribuição, que passará a ter fluxo bidirecional de energia;
- Necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes;
- Aumento da dificuldade para controlar o nível de tensão da rede no período de carga leve;
- Alteração dos níveis de curto-circuito das redes;
- Aumento da distorção harmônica na rede;

- Intermitência da geração, devido à dificuldade de previsão de disponibilidade da fonte (irradiação solar, vento, água, biogás), assim como alta taxa de falhas dos equipamentos;
- Alto custo de implantação;
- Tempo de retorno elevado para o investimento.

3 - Características Técnicas e Regulatórias

Antes de entrar ao mérito das características técnicas dos sistemas solares fotovoltaicos será feita uma breve introdução ao cenário regulatório atual.

3.1 – Regulatório

Até pouco tempo atrás não era possível legalmente uma pessoa física ter seu gerador solar fotovoltaico conectado à rede de distribuição devido à falta de um respaldo regulatório. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) divulgou no dia 17 de abril de 2012 a Resolução Normativa Nº 482 que estabelece as condições gerais para o acesso de minigeração e microgeração distribuída às redes de distribuição de energia elétrica, além do sistema de compensação de energia e das obrigatoriedades de cada parte envolvida, tornando assim possível a conexão do gerador FV conectado diretamente à rede de distribuição de Baixa Tensão.

Pelas definições desta resolução da ANEEL entende-se por microgeração distribuída a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada na rede de baixa tensão da distribuidora através de instalações de unidades consumidoras. E por minigeração distribuída entende-se a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW e que utilize fontes incentivadas, ou seja, com base em de energia

hidráulica de PCHs, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada na rede da distribuidora através de instalações de unidades consumidoras.

A ANEEL, também nessa resolução, definiu o sistema de compensação de energia elétrica, que nada mais é do que uma compensação da energia consumida com a energia gerada. Desta forma, o minigerador ou o microgerador poderá fornecer energia à rede em momentos em que está gerando mais do que consumindo e captar energia da rede caso esteja consumindo mais do que está gerando. Se a diferença do montante de energia do mês, separado por ponta e fora ponta, injetada na rede em relação à energia consumida for positiva esta diferença fica como saldo para os próximos meses que ocorram o caso contrário, sempre dividido por ponta e fora ponta. Esse saldo vence em 36 meses e em hipótese alguma a distribuidora haverá de pagar por essa energia, sendo esse saldo revertido em prol da modicidade tarifária.

Cabe ainda ressaltar que essa compensação pode ser feita em outras unidades consumidoras de mesmo titular ou reunidas por comunhão de interesses de fato ou de direito, com a ressalva de estarem previamente cadastradas na distribuidora para esse fim e atendidas pela mesma distribuidora.

O sistema de medição é semelhante ao Net Metering, sistema internacionalmente conhecido e adotado com sucesso há alguns anos atrás em países desenvolvidos. Como o Brasil não é o pioneiro nesse tipo de sistema é possível aprender com erros e acertos e adaptar para uma maior eficiência e previsibilidade, aumentando as chances de sucesso. A medição é feita por um aparelho especial, internacionalmente conhecido como Net Metering Meter, que consiste na medição do fluxo de energia em uma unidade consumidora dotada de pequena geração, por meio de medidores bidirecionais.

Como já citado acima, há a necessidade de instalar um medidor com mais recursos e que tenha a capacidade de medir fluxo bidirecional, sendo que a diferença de custo entre a adequação ao novo medidor e seus componentes e o medidor antigo será de responsabilidade do interessado, sem ônus as Concessionárias e Permissionárias de Distribuição.

Os equipamentos de medição instalados deverão atender as especificações técnicas do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) e da distribuidora e após a sua adequação, a distribuidora será responsável pela sua operação e manutenção, incluindo os custos de eventual substituição ou adequação. Cabe também as Distribuidoras a responsabilidade de coletar as informações das unidades junto aos minigeradores e microgeradores distribuídos e enviar essas informações a ANEEL. (ANEEL, 2008)

Por fim, assim como qualquer consumidor, os minigeradores e microgeradores distribuídos tem a responsabilidade de não denegrir a qualidade da rede de distribuição, arcando por qualquer distúrbio ou danos ao sistema elétrico de distribuição e suas consequências. Portanto, caso que haja custos comprovadamente causados por distúrbios de um minigerador ou microgerador distribuído, esse custo deverá ser de inteira responsabilidade do gerador e, portanto, a distribuidora não deverá arcar com despesa alguma. Entre esses custos podem-se citar indenizações por danos e necessidade de obras para correção dos efeitos de distúrbios.

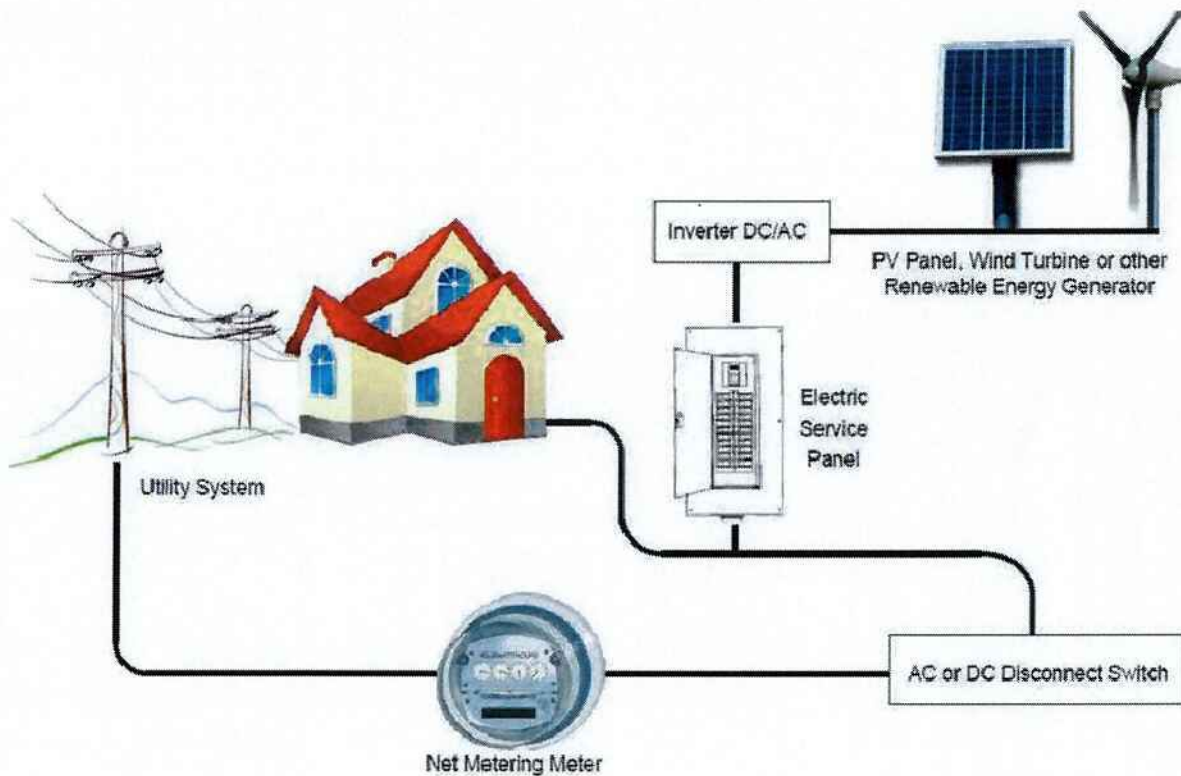


Figura 16 - Pequena geração de energia elétrica conectada à casa e à rede.

Além disso, de acordo com a RN N° 77 de 18 de agosto de 2004 da ANEEL, fontes incentivadas de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 30MW possuem 50% de desconto nas TUST (Tarifa de uso do sistema de Transmissão) e a TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição), criando assim um incentivo financeiro a mais para os empreendedores investirem em energia limpa. Com a RN N° 481 a ANEEL modificou esses descontos citados. Atualmente, empreendimentos com base em fonte solar com potência instalada menor ou igual a 30MW passam a ter um desconto diferenciado nas TUST e TUSD, que passa a ser de 80% para empreendimentos que entrarem em operação comercial até o dia 31 de dezembro de 2017. Esse desconto será aplicável nos 10 primeiros anos de operação da usina. O

referido desconto será de 50% após o décimo ano de operação comercial ou para empreendimentos que entrarem em operação comercial após o dia 31 de dezembro de 2017, valor praticado atualmente.

O desconto deve-se por causa do custo ainda elevado da energia solar (fotovoltaica e termossolar) quando comparado com as demais fontes de energia renováveis disponíveis no mercado. Com isso a ANEEL tem a intenção de incentivar este tipo de energia para que seja mais competitiva ao mercado e assim conduzirá a um processo de ganho em escala e evolução tecnológica, fazendo com que os custos caiam ao ponto em que não seja mais necessária a aplicação de descontos de tarifa acima de 50%, igualando aos descontos das demais fontes renováveis.

No âmbito de incentivar a criação de usinas FV, a ANEEL promoveu a chamada pública referente ao Projeto de P&D Estratégico no 13/2011, “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, onde foram selecionados 18 projetos FV, totalizando 24,578 MWp de potência instalada e um investimento de aproximadamente 400 milhões de reais. (ANEEL, 2011)

3.2 - Dimensionamento da área necessária.

O cálculo da área necessária é importante para obter sensibilidade do assunto e entender como são usados os níveis de irradiação, o porquê da necessidade de grandes áreas de painéis fotovoltaicos, e o motivo da baixa eficiência. Essa metodologia de cálculo leva em conta as simplificações normalmente utilizadas, e é uma boa estimativa para um consumidor saber a área necessária para a geração em KWh/mês pretendida.

Para o cálculo do dimensionamento da área necessária, será demonstrada um cálculo genérico, e logo em seguida um exemplo. (Fadigas)

$$E_{diária} = \frac{E_{Mensal}}{n^{\circ} \text{ dias m\~{e}s}} (KWh / dia)$$

$$NSP = \frac{\text{horas_irradiação} \times \text{média_irradiação}}{\text{irradiação_sol_pleno}}$$

NSP: número de horas de sol pleno

Premissas utilizadas:

horas_irradiação: Horas de irradiação por dia

média_irradiação: Média de irradiação diária

irradiação_sol_pleno: Irradiação quando sol pleno.

A potência instalada é dada por:

$$P_{instalada} = \frac{E_{diária}}{NSP} (W_p)$$

Segue o cálculo da área a ser empregada.

$$P_{instalada} = \eta \times A \times 1000 (W / m^2)$$

$$A = \frac{P_{instalada}}{\eta \times 1000} (m^2)$$

Como entrada do modelo de cálculo acima, deve-se colocar o quanto o consumidor pretende gerar mensalmente de energia FV, o exemplo a seguir:

$$E_{mensal} = Entrada = 300KWh / mês$$

$$E_{diária} = \frac{300}{30} = 10KWh / dia$$

Para o cálculo de potência utilizou-se uma média de 10 horas com 500W/m² de radiação. É considerado sol pleno quando a radiação é de 1KW/m² (padrão) e os cálculos são feitos pelo número de horas de sol pleno – NSP que há de incidência no sistema fotovoltaico. Portanto:

$$NSP = \frac{10 \times 500}{1000} = 5h$$

A potência instalada é dada por:

$$P_{instalada} = \frac{E_{diária}}{NSP} = \frac{10000}{5} = 2000W_p$$

Para o cálculo da área necessária, utiliza-se o rendimento da célula fotovoltaica com os valor de 12%. Esse valor foi retirado de acordo com a figura 17 que será analisada um pouco mais à frente.

Abaixo segue o cálculo da área a ser empregada.

$$P_{instalada} = \eta \times A \times 1000 (W / m^2)$$

$$2000 = 0,12 \times A \times 1000 (W / m^2)$$

$$A = 16,7 m^2$$

Portanto, para se conseguir uma média de 300KWh de energia por mês de geração solar, o que já seria possível suprir as necessidades de energia elétrica de uma casa de classe média de 4 pessoas, deve-se instalar 16,7 m² de área de módulos fotovoltaicos com eficiência de 12%. Essa área não é elevada se comparada com a área total dos telhados de uma casa de classe média, porém o valor pago por este equipamento ainda seria muito elevado para uma família de classe média.

3.3 - Células fotovoltaicas.

A energia solar pode ser usada em células solares, transformando-a diretamente em energia elétrica útil ou também indiretamente, como são os casos dos aquecedores térmicos que utilizam a energia solar para aquecer a água que será utilizada para o banho, por exemplo, não transformando-a em energia elétrica.

Para efeitos deste estudo serão analisados somente as células fotovoltaicas, sua construção, composição, eficiência, e influência em uma microrrede de distribuição elétrica genérica.

3.3.1 - Construção

As Tecnologias Empregadas nos Painéis Fotovoltaicos são:

3.3.1.1 - Silício monocristalino e policristalino

O silício monocristalino é tem um preço mais elevado devido ao seu maior grau de pureza, e por isso seu processo de fabricação deve ser mais rigoroso. O gasto de energia também é mais elevado no monocristalino apesar de que as etapas de fabricação são as mesmas. Quanto a eficiência, ambos são próximos, com uma.

3.3.1.2 - Filmes finos

Chamados assim, pois são constituídos de camadas extremamente finas de material semicondutor, coberto com vidro ou plástico para proteção. Seu processo de fabricação é tido como de baixo custo, porém sua eficiência também é menor e diminui ainda mais ao longo dos primeiros meses.

3.3.1.3 - Concentrador fotovoltaico

Como o nome já explica, o equipamento concentra os raios solares em uma área menor, aumentando a eficiência da absorção da irradiação e, portanto, demandando menor quantidade de células PV.

Tecnologia	Eficiência	Área/kW_p
Silício cristalino		
Monocristalino	13 a 19%	~7m ²
Policristalino	11 a 15%	~8m ²
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	~15m ²
Telureto de Cadmio (Cd-Te)	10 a 11%	~10m ²
Disseleneto de cobre-indio-gálio (CIGS)	7 a 12%	~10m ²
Concentrador fotovoltaico	~25%	

Figura 17 - Rendimento e Área/KWp para cada material. [25]

A recente divulgação do National Renewable Energy Laboratory (NREL) mostra, no gráfico da figura 17 a evolução da eficiência da célula fotovoltaica ao longo dos anos. Portanto pode-se ver o quanto essa tecnologia já evoluiu e o quanto ainda espera-se que ela evolua, barateando preços, aumentando eficiências e tornando-a cada vez mais competitiva. [24]

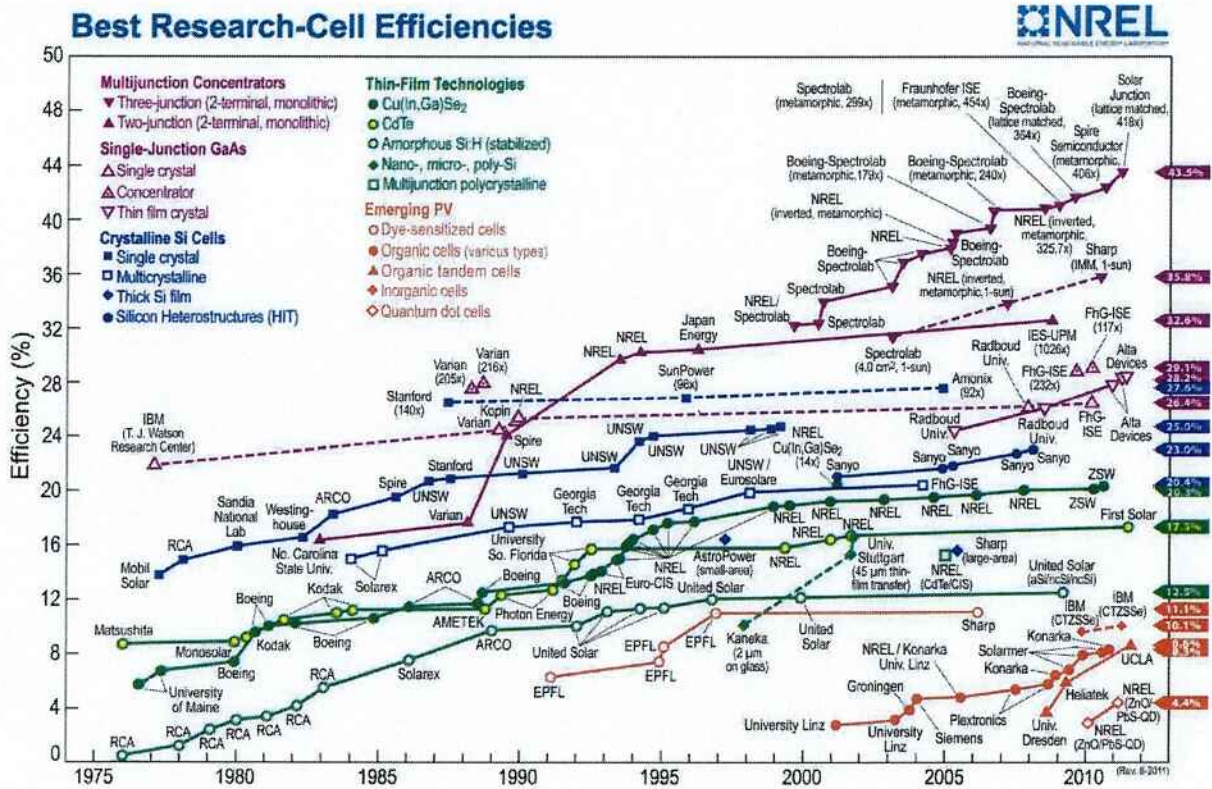


Figura 18 - Eficiência de Células Fotovoltaicas - NREL

Sua construção é feita com materiais semicondutores, geralmente o silício com materiais dopantes como o fósforo que deixa um elétron livre, sendo este responsável pela corrente ou aceitador como é o caso do boro que cria um buraco que também origina a corrente produzida.

3.3.2 - Funcionamento

Seu funcionamento se dá através do Efeito fotovoltaico no qual a iluminação do material cria uma corrente elétrica à medida que os elétrons excitados e os buracos remanescentes são arrastados em direções diferentes pelo campo elétrico da região de depleção.

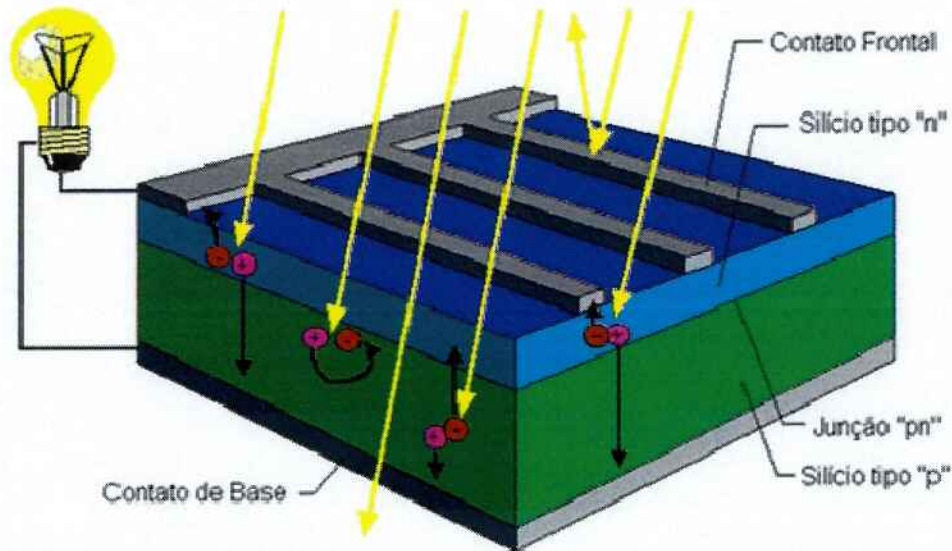


Figura 19 - Ilustração de célula fotovoltaica (CRESESB)

O circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica é demonstrado na figura abaixo: (Fadigas)

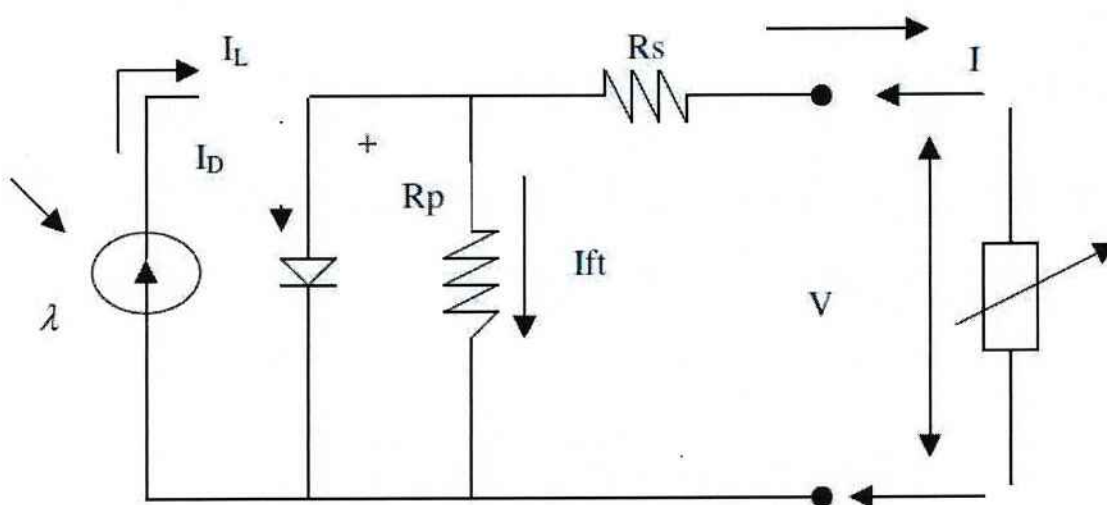


Figura 20 - Circuito Elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

I_L – corrente gerada pela incidência da irradiação

I_D, I_0 – corrente de saturação do diodo

I_{ft} - corrente de fuga para terra

I – corrente nos terminais de saída

R_p – resistência shunt

R_s – resistência série

Numa célula ideal, R_p seria infinita, ou seja, não haveria corrente de fuga para a terra e R_s seria zero, ou seja, sem perdas internas na célula.

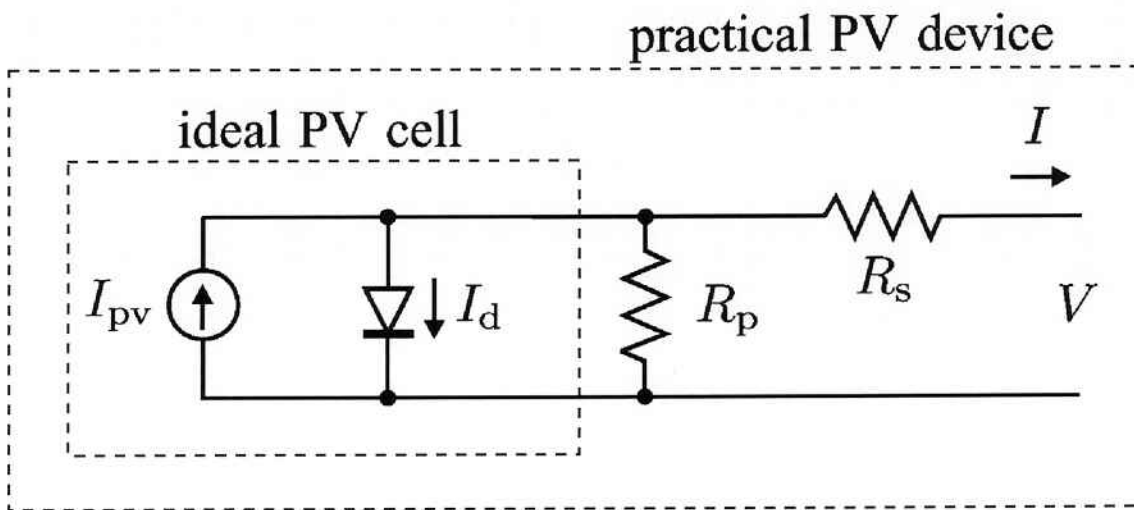


Figura 21 - Modelo da Célula Fotovoltaica

Idealmente a corrente resultante é dada por: (Rauschenbach, 1980)

$$I = I_{pv} - I_d \left(e^{\frac{qV}{akT}} - 1 \right)$$

I_{pv} – corrente gerada pela incidência da irradiação

I_D, I_0 – corrente de saturação do diodo

I – corrente nos terminais de saída

K – constante de Boltzmann

T – temperatura da junção p-n

a – constante do diodo (em relação ao ideal)

Assim a curva resultante é dada por: (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009)

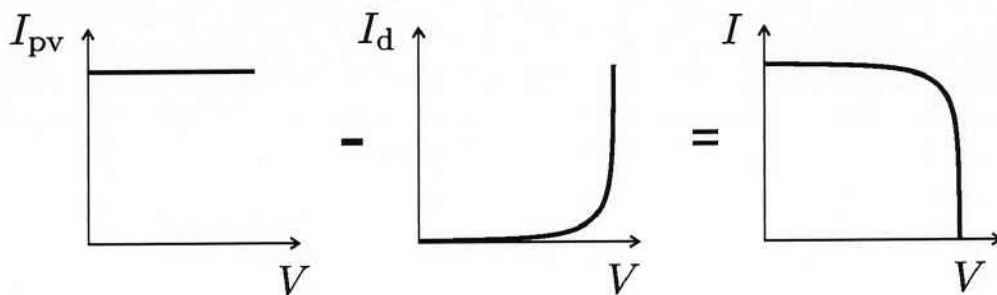


Figura 22 - Curva resultante de uma célula fotovoltaica

A curva a seguir demonstra o ponto de entrega de potência máxima da célula junto com a curva de $V \times I$:

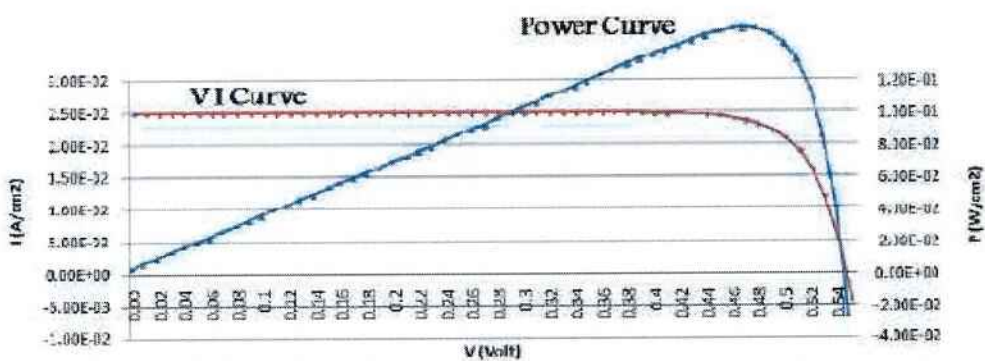


Figura 23 - Curva de Potência de uma célula fotovoltaica (Nor, Syafii, & Abdel-Akher, 2010)

Alguns parâmetros importantes para se analisar uma célula são a corrente de curto circuito em seus terminais I_0 e a tensão em aberto de saída V_0 .

Tomando I_{CC0} e V_{CC0} como corrente de curto e tensão em aberto a uma temperatura de referência T, a fórmula abaixo mostra como esses valores variam em função da temperatura, sendo α e β seus respectivos coeficientes de temperatura.

$$I_0 = I_{CC0}(1 + \alpha\Delta T) \text{ e } V_0 = V_{CC0}(1 - \beta\Delta T)$$

Portanto a potência resultante será: (Patel, 1999)

$$P = VI = I_{CC0}(1 + \alpha\Delta T)V_{CC0}(1 - \beta\Delta T)$$

No caso de um módulo de células, a equação se modifica um pouco, levando em conta o número de células que há em série e em paralelo. Segue a fórmula:

$$I = I_{pv} - I_d \left(e^{\frac{V + IR_s}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Considerando N_p o número de conjuntos de séries de células em paralelo e N_s o número de células em série de cada um desses conjuntos, e substituindo-os na fórmula, teremos a corrente de um módulo série/paralelo.

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\frac{V_{oc} + K_V \Delta T}{aV_t}} - 1}$$

Uma única célula possui um poder relativamente baixo de geração e manipulação, aproximadamente 0,6V. Portanto um conjunto dessas células compõe o módulo fotovoltaico, que nada mais é que ligações série paralelo de células, com diodos bypass e diodo de bloqueio. Os componentes de bloqueio e bypass servem para atenuar a ação de algumas células que não se comportam uniformemente e, portanto sem estes haveria uma perda grande de potência. A ligação em série multiplica diretamente a capacidade de tensão e a ligação em paralelo multiplica diretamente a capacidade de corrente gerada. (Lopes, 2007)

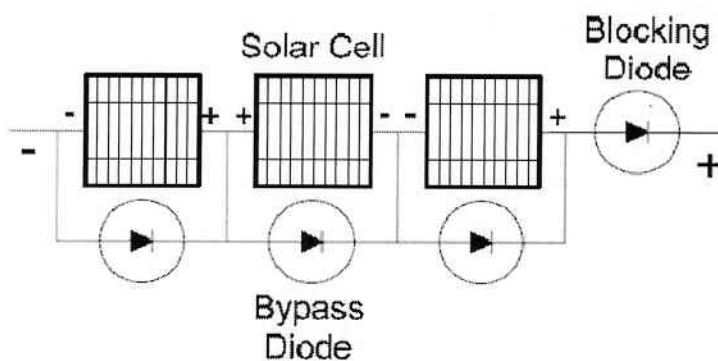


Figura 24 - Exemplo de Módulo FV em Série

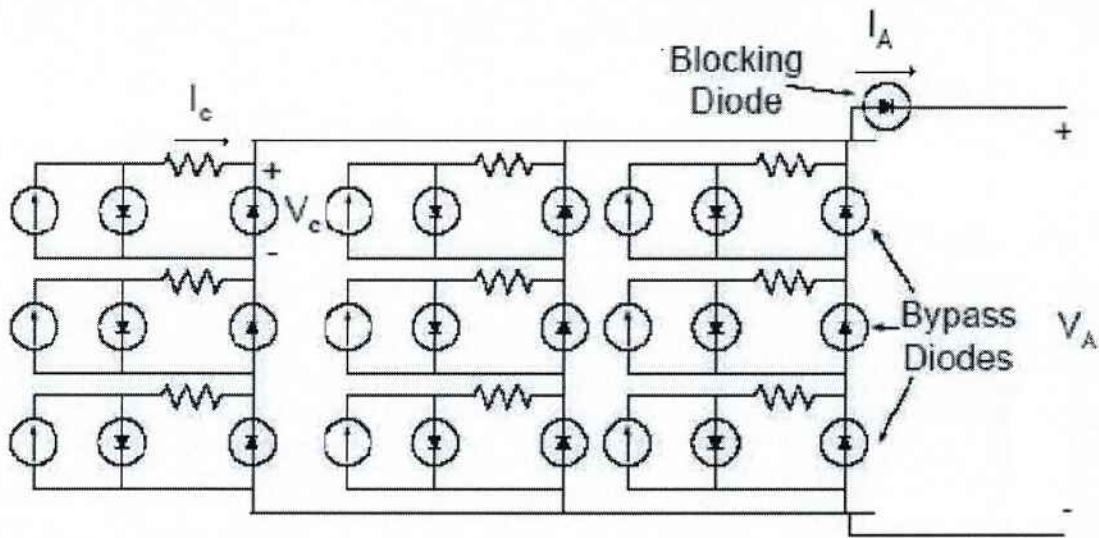


Figura 25 - Exemplo de Módulo FV em Paralelo

3.4 - Tipos de ligação do sistema à rede

A ligação regulamentada pela ANEEL através da Resolução 390/2009 é que haja um medidor para a carga e um medidor para a produção fotovoltaica. Como na figura abaixo: (Zilles, 2011)

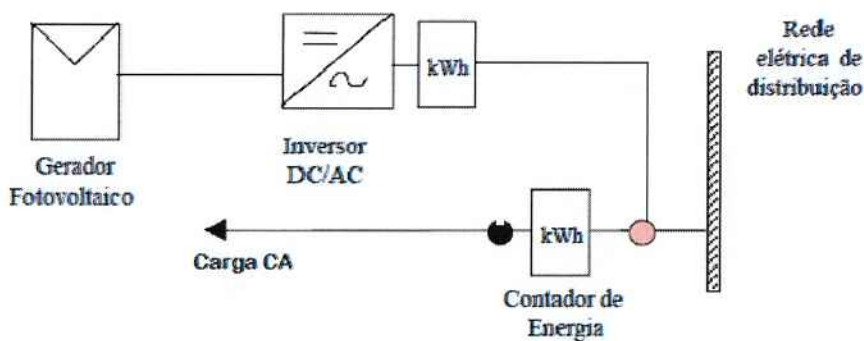


Figura 26 - Exemplo de Instalação do Medidor - Carga

Dessa maneira, ambos os medidores só tem um fluxo de potência, portanto não são bidirecionais. Os medidores bidirecionais são mais robustos, completos e, portanto mais caros, aumentando ainda mais o custo total do projeto. De acordo com a ANEEL, o cliente será o responsável pela instalação desse medidor, diferentemente de um consumidor residencial comum (B2), onde a distribuidora é a responsável pela instalação dos medidores.

Outra maneira de ligação seria a da figura abaixo em que o controlador está entre a rede e o ponto de fornecimento, portanto esse medidor consegue medir o fluxo bidirecional de energia. Caso esse seja um relógio, ele “gira para trás”, ou seja, quando a produção é maior que o consumo o relógio regride, diminuindo a quantidade de energia que o conjunto consumiu.

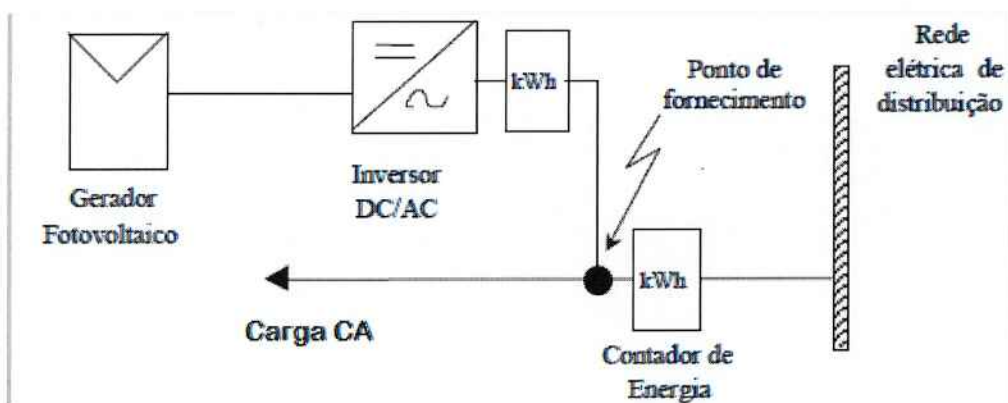


Figura 27 - Exemplo de Instalação do Medidor - Fornecimento

3.5 - Sistemas Isolados e Sistemas conectados à rede

Os sistemas isolados diferem dos sistemas conectados à rede. Primeiramente pelo conjunto de baterias, que em um sistema conectado à rede não existe. Em segundo lugar pelo sistema inversor. Os tipos de inversores utilizados em sistemas conectados à rede não funcionam isoladamente (caso a rede cai ou haja uma desconexão).

Em sistemas conectados a rede, que são os que serão tratados mais profundamente nesse trabalho, o inversor é o elemento que condiciona a potência fotovoltaica para sua posterior conexão a rede. Esse tipo de inversor só funciona conectado à rede, pois usa seu sinal como referência de tensão e frequência. Ainda entre a rede e o inversor é recomendado usar um sistema de proteção AC, para que não haja danos no sistema fotovoltaico e no inversor.

Alguns módulos fotovoltaicos possuem o inversor já embutido podendo, portanto conectá-lo direto na rede (módulo CA). O mais comum é utilizar um módulo e seu inversor separadamente (string). Outra maneira também utilizada é a ligação de muitos módulos em um mesmo inversor (Multi-string-configuration). (Macedo, 2006)

Para os cálculos efetuados nesse projeto, foi considerado um inversor ideal para esta primeira etapa, porém é um equipamento que merece uma atenção à parte por causa da sua complexidade, podendo acarretar desde grandes perdas de eficiência até geração de harmônicos.

3.6 - Inversores

Os inversores tem um papel fundamental na ligação do sistema solar fotovoltaico à rede de distribuição de energia elétrica. É o inversor que faz transformação da energia CC gerado pelo sistema FV para energia CA utilizada nas

redes de distribuição. Cabe ao inversor manter a tensão e frequência adequadas, não permitir mudanças abruptas de corrente, fazer a proteção tanto para surtos na rede (externos) quanto para surtos do sistema FV (internos), e de certa forma, isolar os sistemas de distribuição e o FV.

A principal função do inversor é transformar a geração corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) para injeção na rede. Os inversores normalmente utilizados para sistemas FV funcionam da seguinte maneira: a tensão e a frequência da rede servem de base e eles copiam essas para assim injetarem na mesma frequência e tensão. Não pode haver descasamento do gerador com a rede. Os principais indicadores do inversor são os custos, a eficiência e sua duração em tempo de uso. A figura 28 mostra os três parâmetros com a evolução dos anos. (Mallwitz & Engel, 2010)

	1990	2009	2015
Price	1 Euro/W	0,3 Euro/W	0,2 Euro/W
Efficiency	90 %	96 - 98 %	97 - 99 %
Reliability, Service	MTBF: 0,1 million h	MTBF: 0,5 million h	MTBF: 1 million h
Additional Benefits		Backup functions & storages, power quality improvements, ancillary system services, ...	

Figura 28 - Evolução dos Inversores

Como os inversores tem uma elevada importância no sistema, a ABNT NBR tem algumas está elaborando algumas regras específicas para inversores de sistemas fotovoltaicos. De acordo com algumas propostas para essa regra específica, o inversor para conexão de sistemas fotovoltaicos não deve injetar corrente CC superior a 1% da corrente nominal de saída do inversor, na rede sobre qualquer condição operacional. A distorção harmônica total (THD) de corrente deve ser inferior a 5%, na potência nominal do inversor.

Para a proteção, quando a tensão em regime permanente da rede, no ponto comum de conexão, sai da faixa de operação adequada, para sobretensão, especificada no PRODIST, o inversor deve interromper o fornecimento de energia à rede. (ABNT CE - 03:082.01 (Pinto, Aimé; Belt, Ildo))

4 – Análises das Tensões

4.1 - Modelagem

A figura 1 representa o circuito elétrico do sistema estudado. Tal sistema é a representação de um circuito secundário (baixa tensão) a partir do suprimento de um único transformador MT/BT em um ponto. As cargas são todas residenciais e os vãos entre os postes são de 23,2 m.

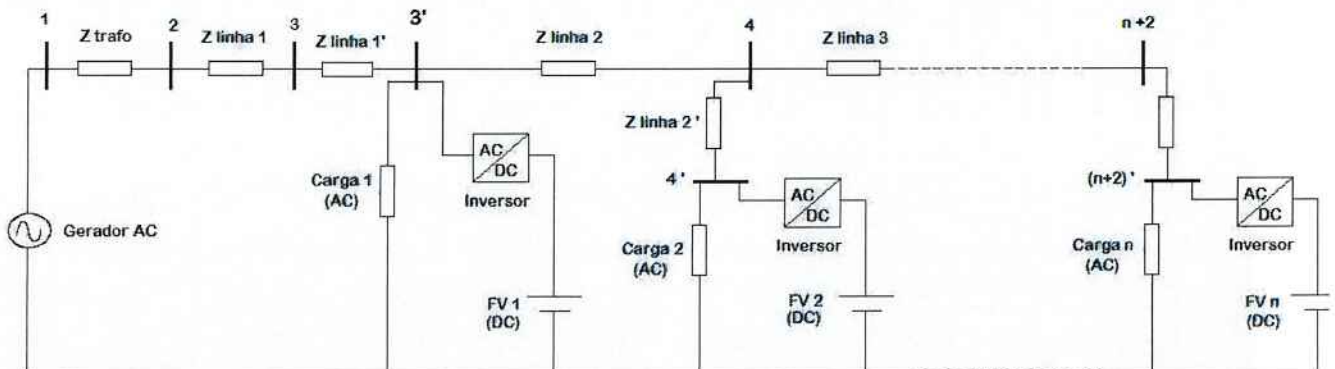


Figura 29 - Circuito do Modelo Completo em Estudo

O desenvolvimento de uma modelagem do sistema possibilita a generalização para qualquer tamanho da rede, permitindo o cálculo dos fluxos e das tensões ao longo da rede.

O modelo reduzido utilizado está representado na figura 2 no qual todos os microgeradores e cargas são representadas de forma agregada pela fonte fotovoltaica 1 e carga 1 respectivamente.

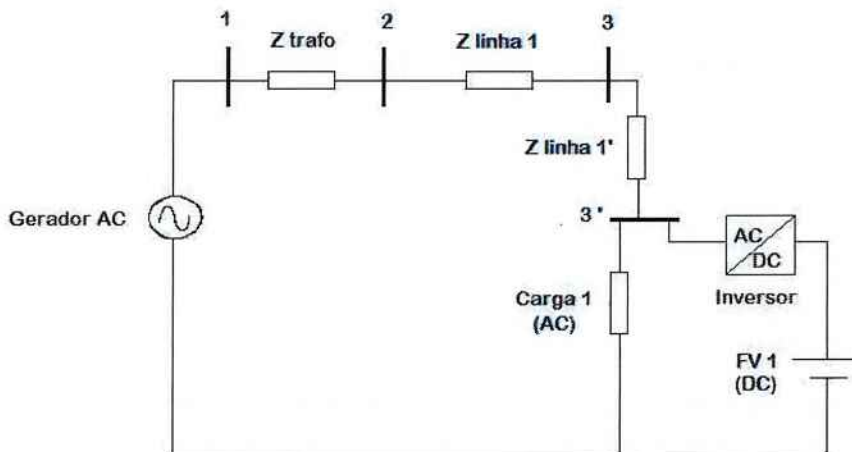


Figura 30 - Circuito Modelo Reduzido

4.2 - Curvas Utilizadas Nas Simulações

Para as simulações foi utilizado o programa SINAP versão 1.9 e com uma curva típica de carga residencial modelada como sendo de corrente constante, e uma curva típica de gerador fotovoltaico, como será mostrado a seguir.

A figura 3 mostra o gráfico de um dia típico, por divisão horária para carga residencial de 1MWh por mês.

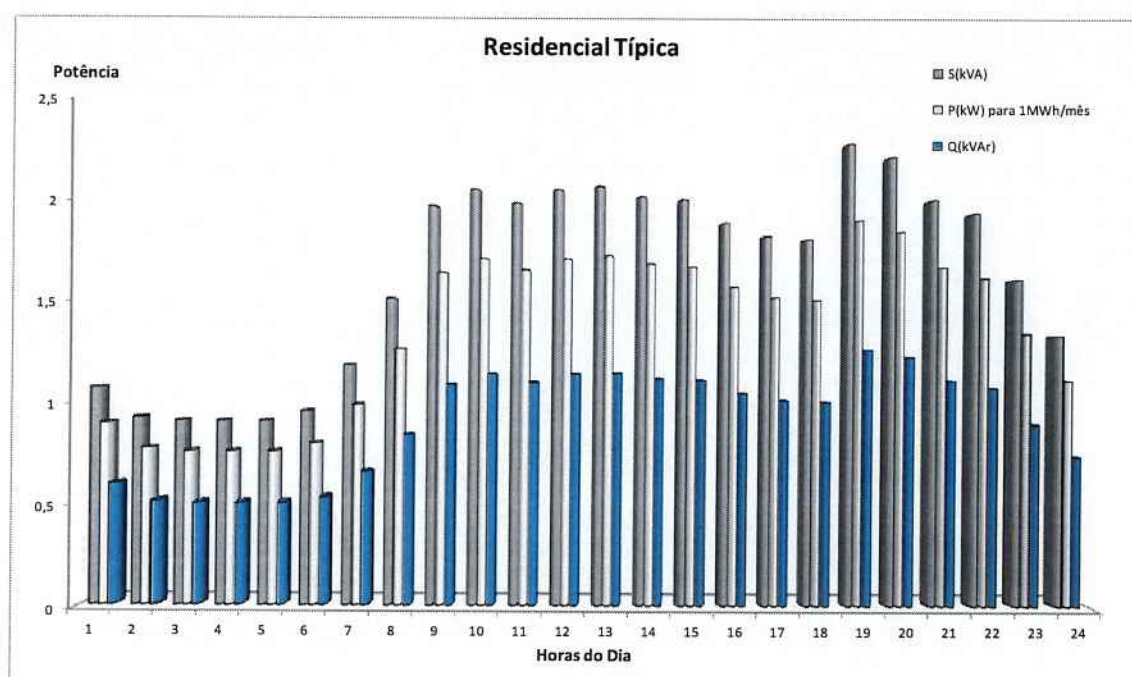


Figura 31 - Residencial - 1MWh/mês

O gerador fotovoltaico será representado por uma barra PQ com potência ativa conhecida ao longo do dia e potência reativa nula.

Foi comparada a potência ativa da carga com a potência ativa do gerador típico, como demonstrado pelas figuras 4, 5 e 6.

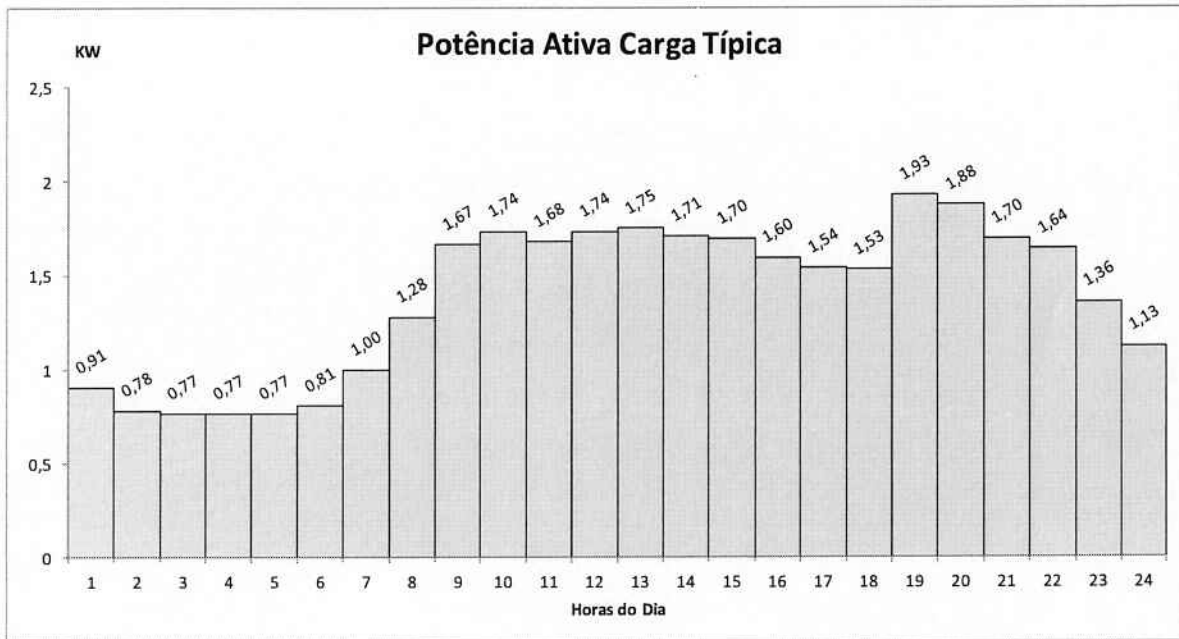


Figura 32 - Potência Ativa da Carga - 1MWh/mês.

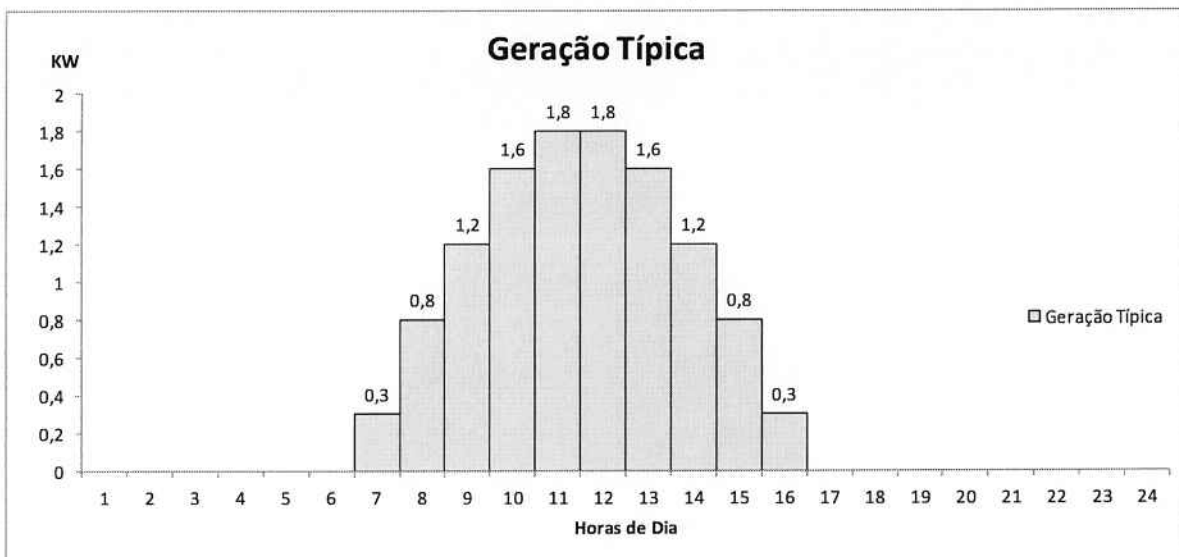


Figura 33 - Gerador Fotovoltaico

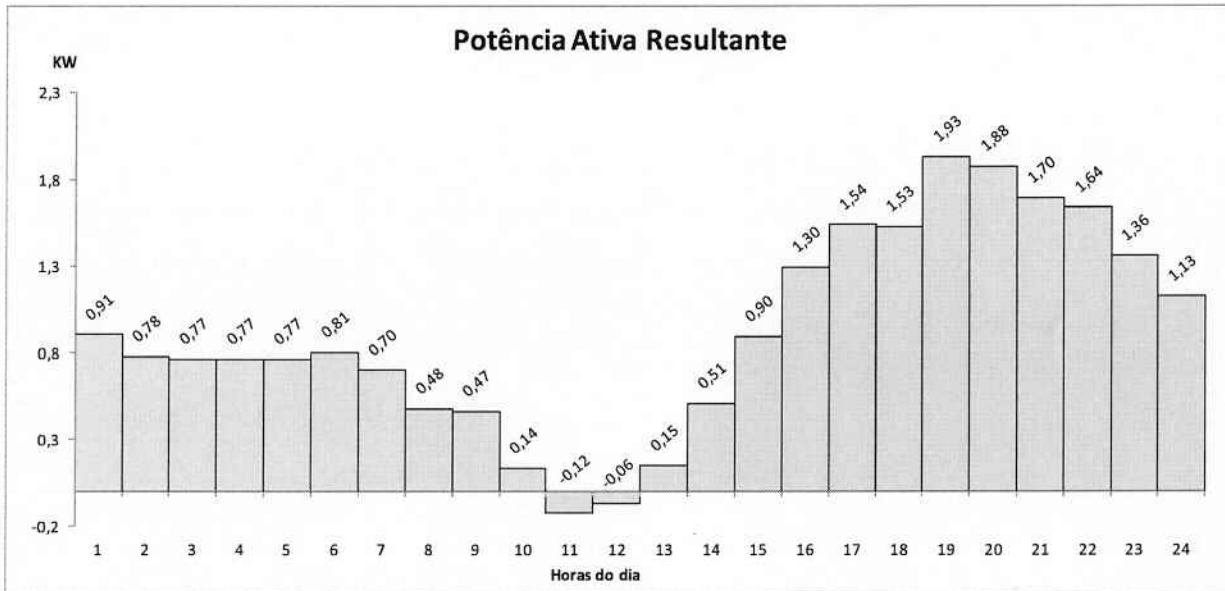


Figura 34 - Potência Ativa Resultante

Observa-se no gráfico da figura 5, a geração corresponde a 11,4 KWh por dia de geração solar, ou seja, 342 KWh por mês, o que representa 34,2% do consumo de energia desse consumidor. Essa geração seria suficiente para suprir totalmente a necessidade energética de uma família de classe média.

Nota-se que entre 10h e 12h a carga está injetando potência ativa na rede, ou seja, haverá fluxo no sentido carga – transformador na rede.

4.3 - Validação Do Modelo Reduzido

A partir das representações da carga e do gerador que foram utilizados em todas as simulações, procedeu-se à validação do modelo.

Foram analisadas as tensões na barra 3' em ambos os casos, tanto para o modelo reduzido quanto para o modelo completo.

Para o modelo reduzido, cada carga inserida é agregada a carga total da rede na barra 3'. Por exemplo, se na rede forem utilizadas 6 cargas ($n = 6$), no modelo reduzido a carga 1 modelada deverá corresponder a 6 vezes a demanda de carga típica e a demanda do gerador modelado será também igual a 6 vezes a do gerador típico.

Com essas considerações, seguem os resultados para os casos de $n = 3, 6$ e 10 .

As figuras 7, 8 e 9 correspondem aos casos para $n = 3$.

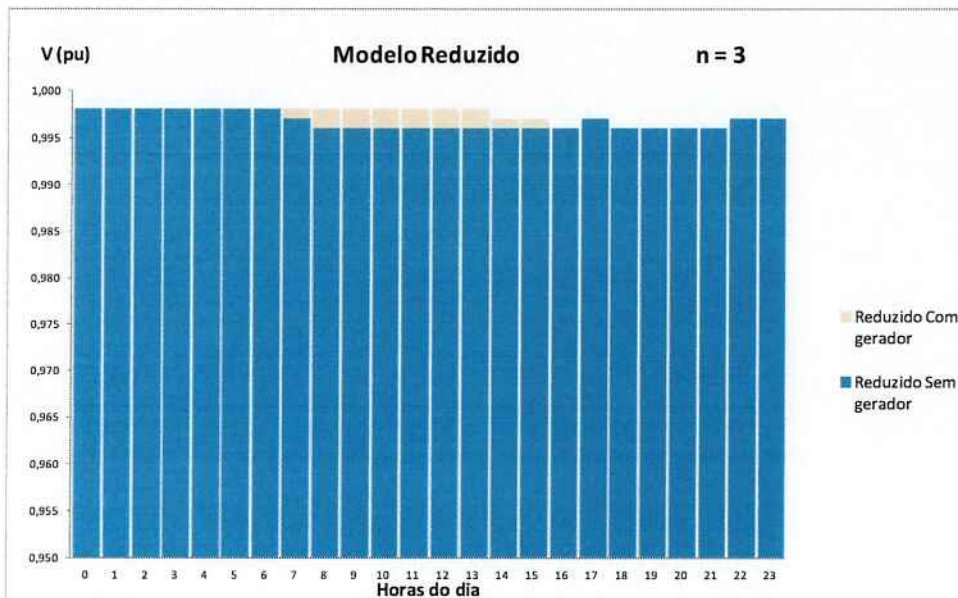


Figura 35 - Modelo Reduzido para $n = 3$.

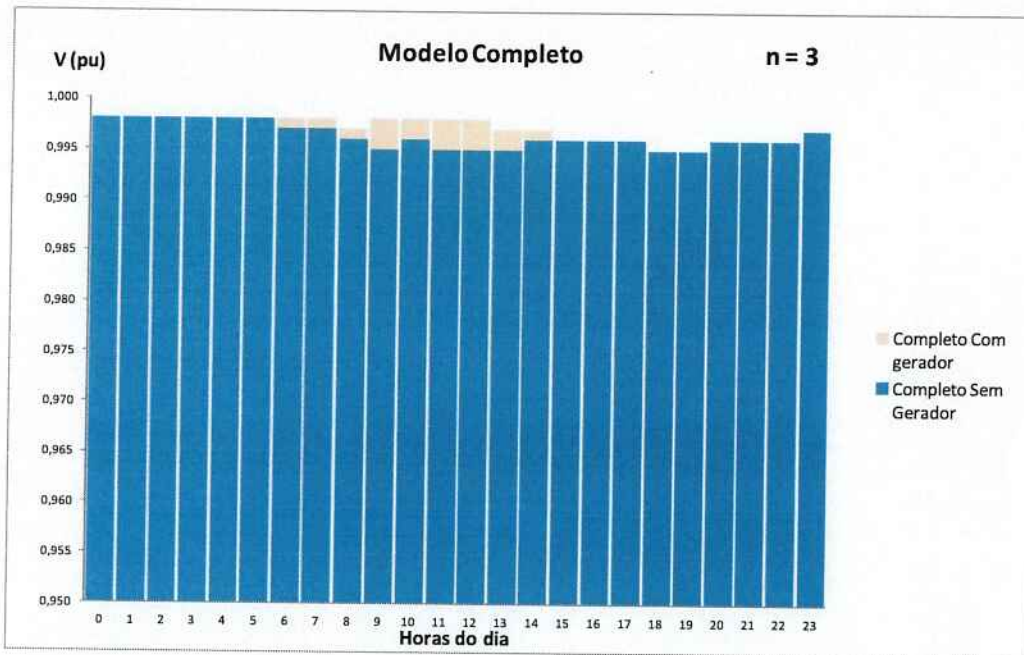


Figura 36 - Modelo Completo n = 3.

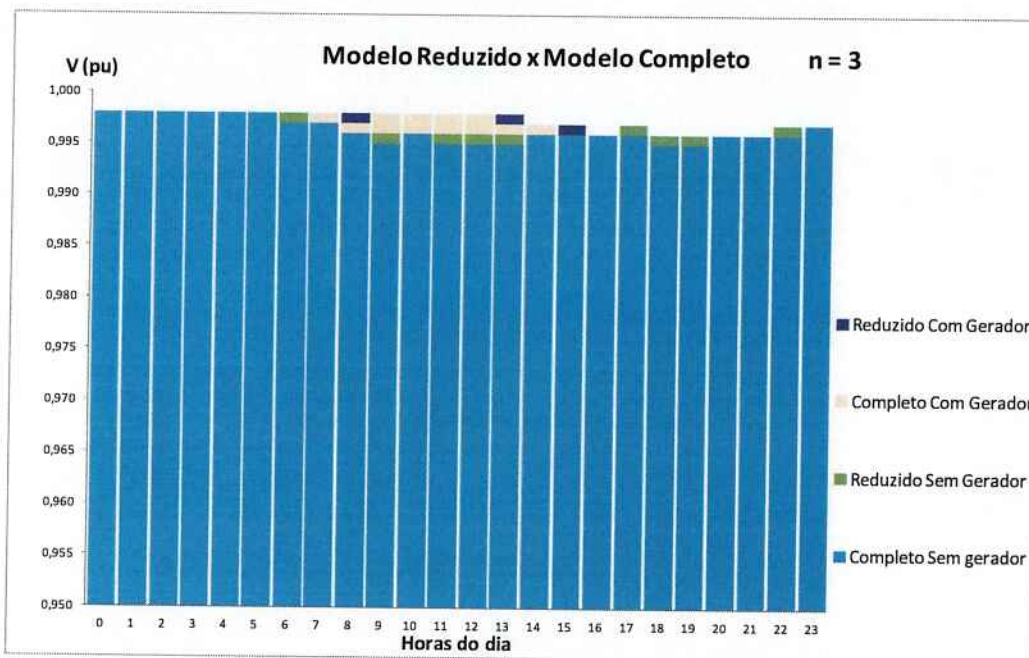


Figura 37 - Modelo Reduzido x Modelo Completo para n = 3.

As figuras Figura 38 - Modelo Reduzido para n = 6., Figura 39 e Figura 40 correspondem aos casos para n = 6.

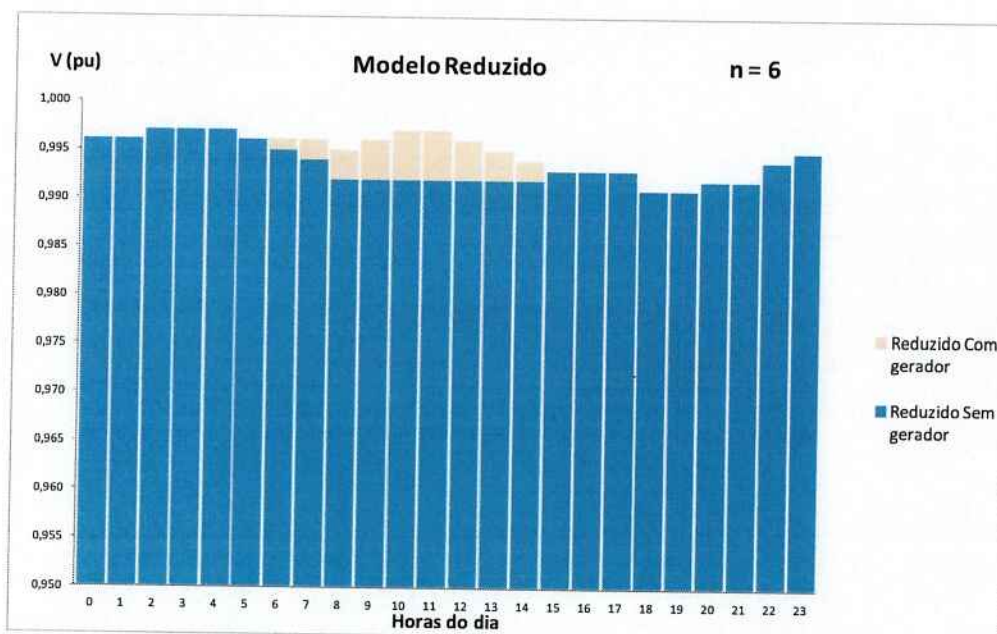


Figura 38 - Modelo Reduzido para n = 6.

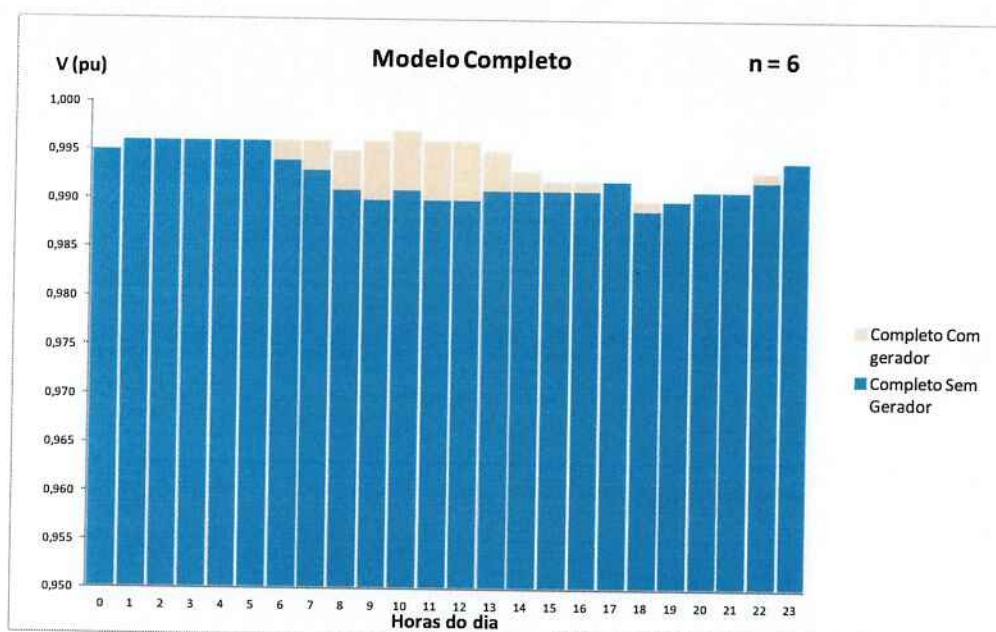


Figura 39 - Modelo Completo para n = 6.

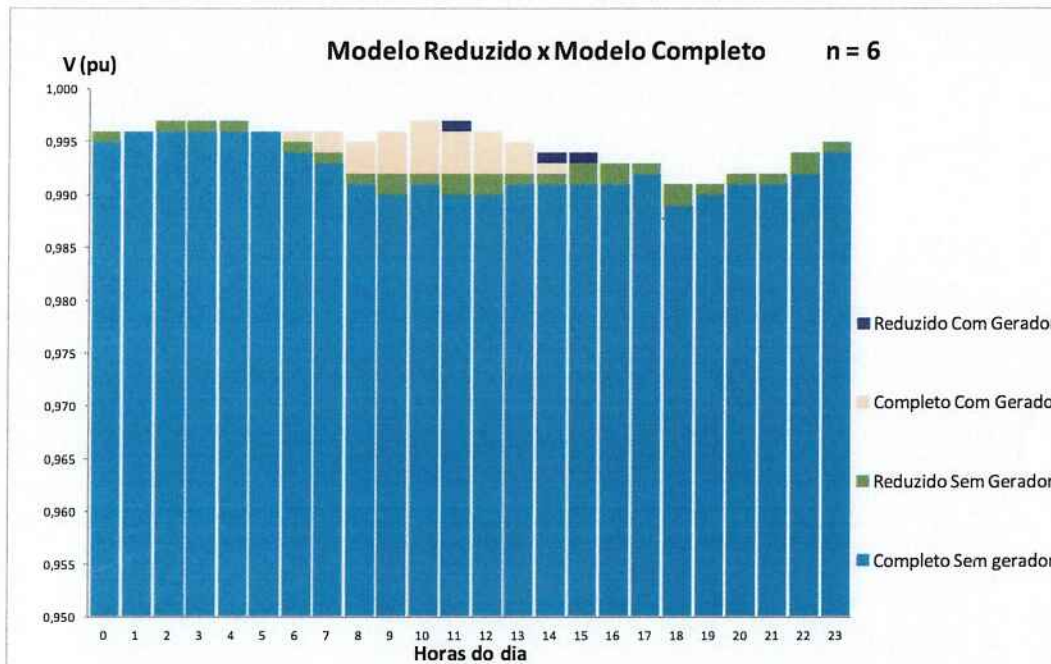


Figura 40 - Modelo Reduzido x Modelo Completo para n = 6.

As figuras 13, 14 e 15 correspondem aos casos para n = 10.

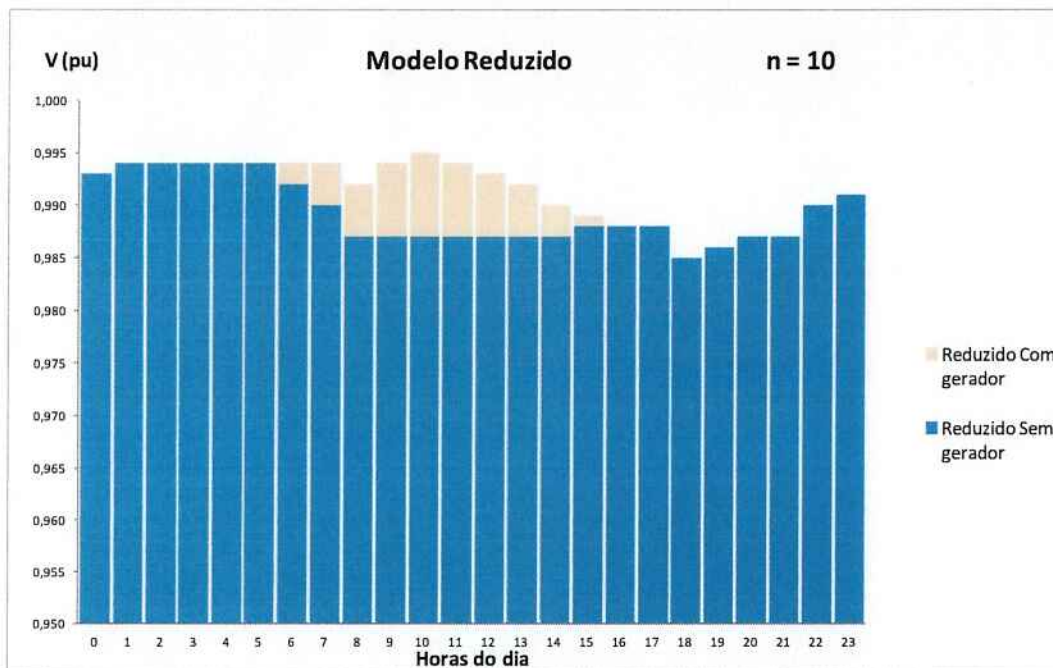


Figura 41 - Modelo Reduzido para n = 10.

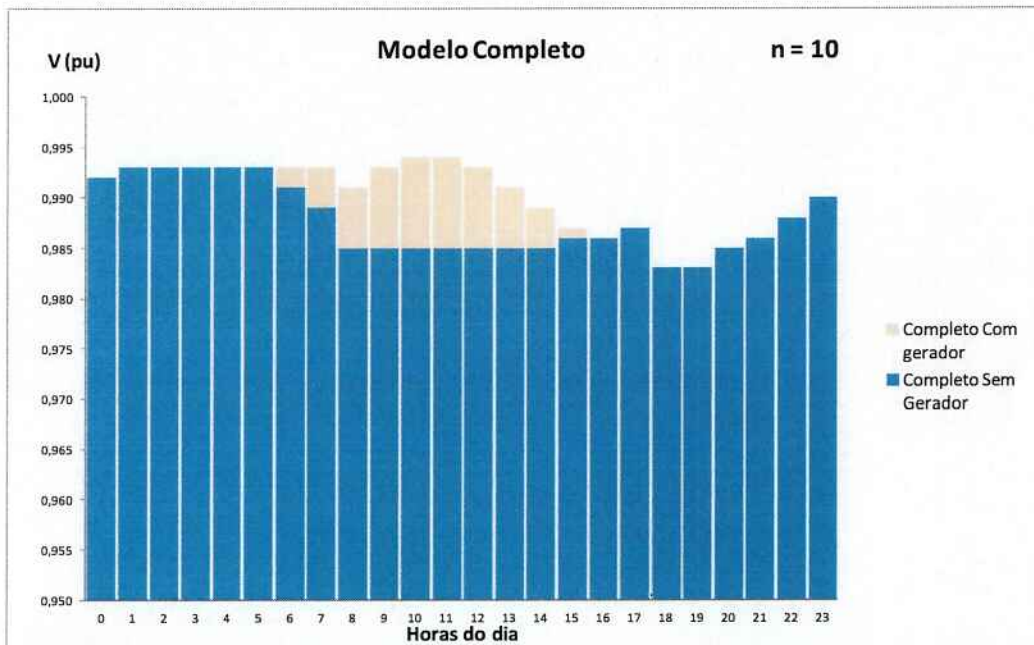


Figura 42 - Modelo Completo para n = 10.

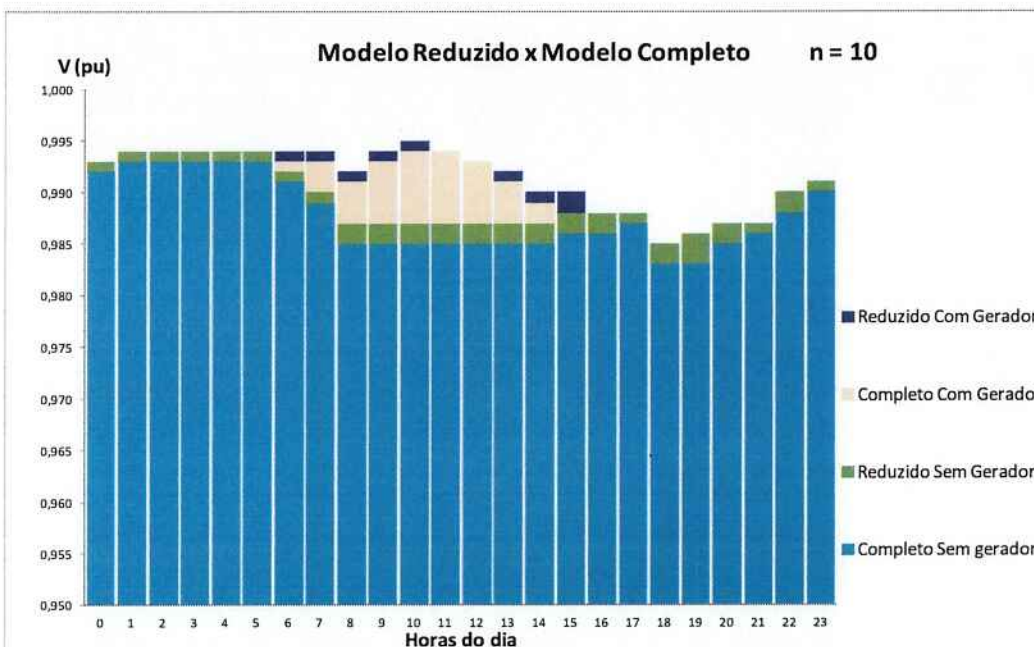


Figura 43 - Modelo Reduzido x Modelo Completo para n = 10.

As figuras demonstram as diferenças ocorridas entre o modelo reduzido e o modelo completo, evidenciando os erros devido à modelagem proposta.

Percebe-se, portanto, que o modelo reduzido adere bem ao modelo completo. As diferenças encontradas justificam-se pelas perdas ativas nos trechos de linha que não são representados no modelo reduzido.

Portanto, conforme aumentamos n , elevam-se as perdas no modelo completo, implicando também em um aumento do erro atrelado ao modelo reduzido.

O gráfico da figura 16 mostra o comportamento da tensão no último consumidor (barra $(n+2)$)' do modelo completo.

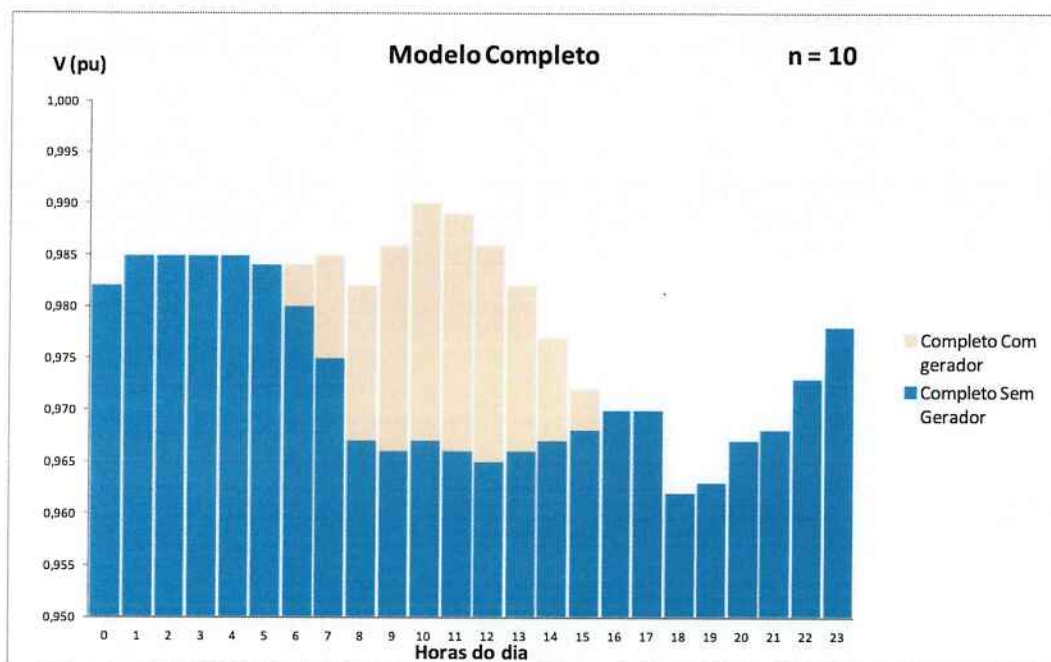


Figura 44 - Modelo Completo para $n = 10$, medição em n .

Naturalmente, quanto mais longe da geração (suprimento), menor é a tensão na carga, pois maiores são as linhas, e assim maior será a perda nas linhas, e as

correspondentes quedas de tensão. Conseqüentemente, quanto mais perto da geração, melhor é a qualidade de tensão.

Analogamente acontece para o caso da geração fotovoltaica. O painel FV2 (modelo completo) afetará consideravelmente o perfil da tensão na barra 3', mas não irá aumentar significativamente tensão na barra (n+2)' para n = 10.

O modelo reduzido mostrou-se válido mesmo para simulação feita com n = 30, revelando erros menores ou iguais a 0,74% como observado na tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Diferenças entre Modelo Reduzido x Modelo Completo para n = 30.

Com gerador	Modelo			Com gerador	Modelo		
	Hora do Dia	Reduzido	Completo		Diferença (%)	Hora do Dia	Reduzido
0	0,979	0,976	0,31%	12	0,981	0,978	0,31%
1	0,982	0,979	0,31%	13	0,976	0,974	0,21%
2	0,983	0,98	0,31%	14	0,972	0,969	0,31%
3	0,983	0,98	0,31%	15	0,967	0,963	0,42%
4	0,983	0,98	0,31%	16	0,965	0,959	0,63%
5	0,982	0,979	0,31%	17	0,965	0,96	0,52%
6	0,981	0,978	0,31%	18	0,956	0,949	0,74%
7	0,981	0,979	0,20%	19	0,957	0,95	0,74%
8	0,977	0,975	0,21%	20	0,961	0,955	0,63%
9	0,981	0,979	0,20%	21	0,962	0,957	0,52%
10	0,985	0,983	0,20%	22	0,969	0,964	0,52%
11	0,983	0,981	0,20%	23	0,974	0,97	0,41%

4.4 - Influência Do Gerador No Nível De Tensão

4.4.1 - Influência do gerador no nível de tensão para carga do tipo corrente constante

Através do modelo reduzido foi estudada a influência do gerador fotovoltaico na tensão da barra 3'.

Os gráficos das figuras 18, 19, 20, 21 e 22 representam o perfil da tensão resultante na barra 3' para $n=1$, $n=5$, $n=10$, $n=15$ e $n=20$ respectivamente.

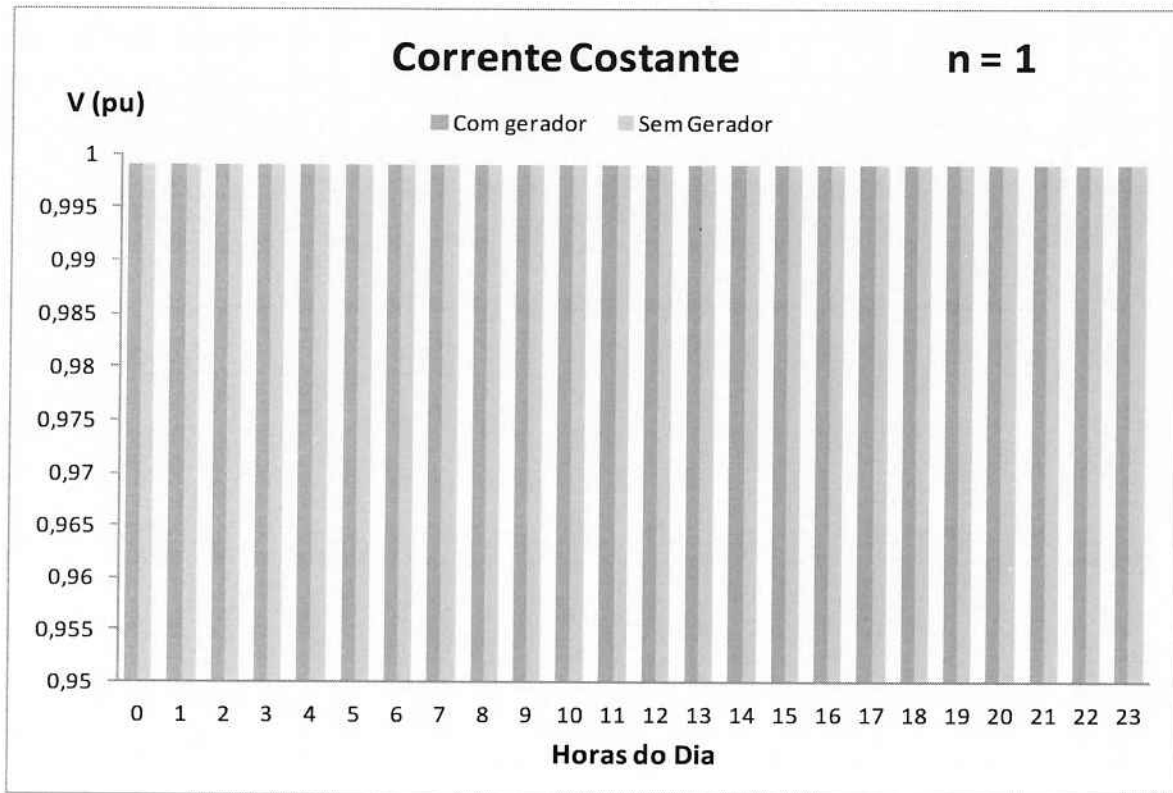


Figura 45 - Modelo reduzido, corrente constante para $n = 1$.

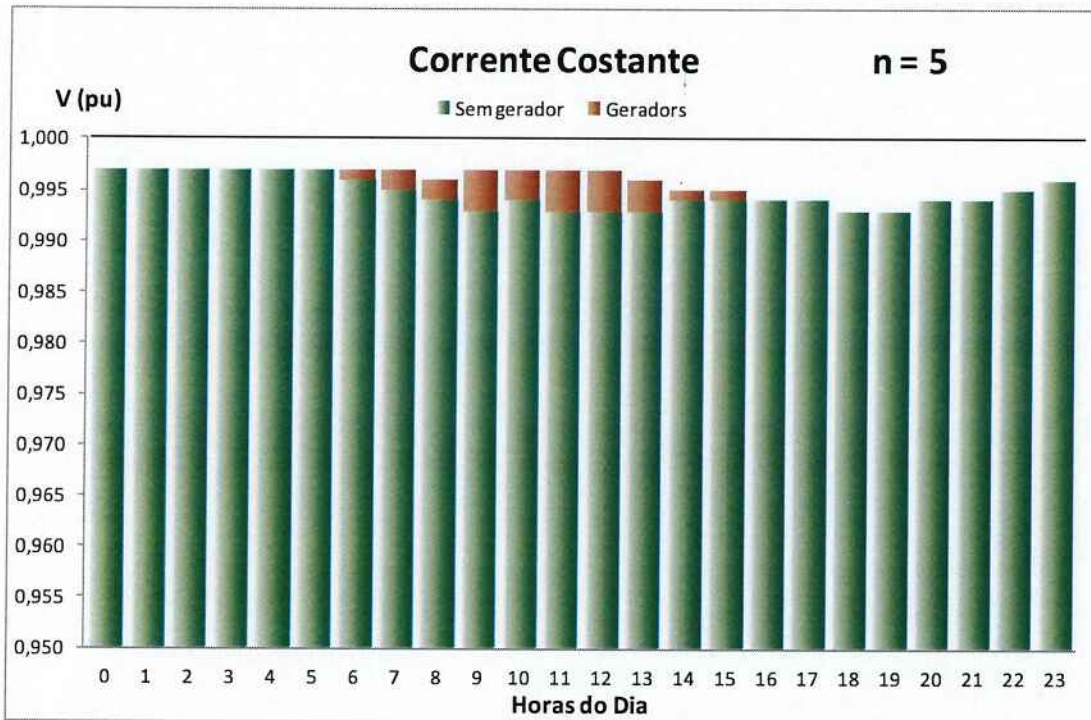


Figura 46 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 5.

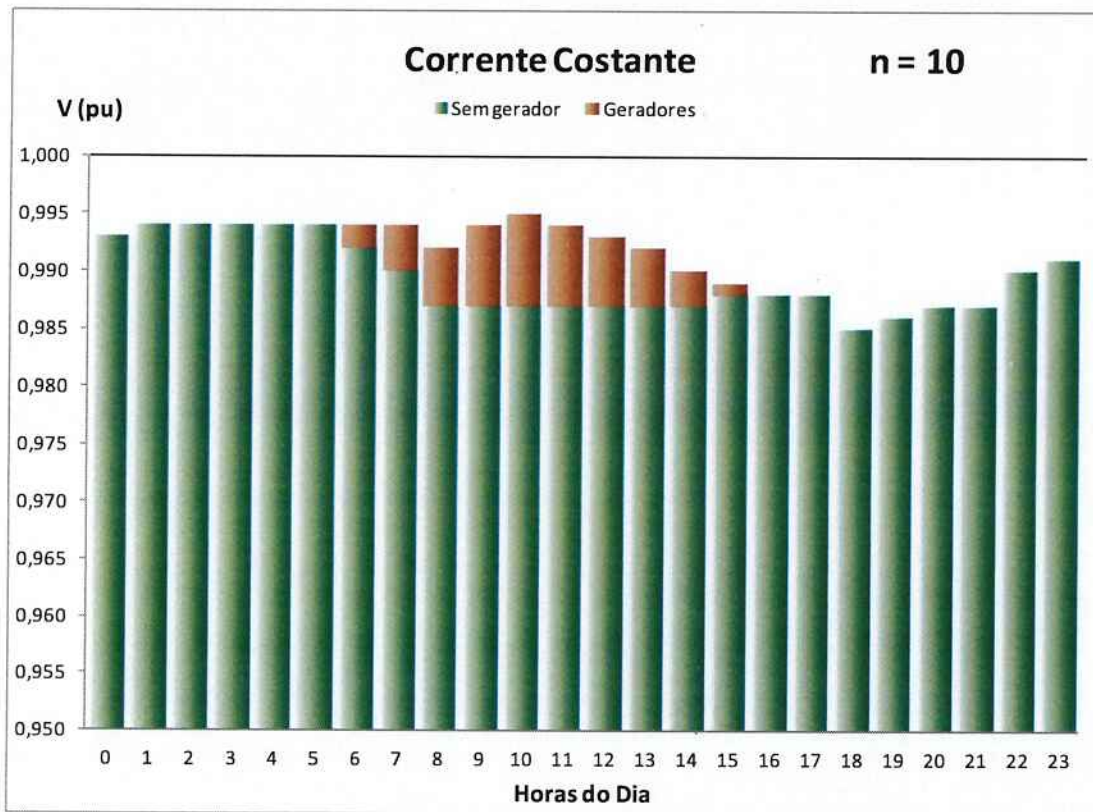


Figura 47 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 10.

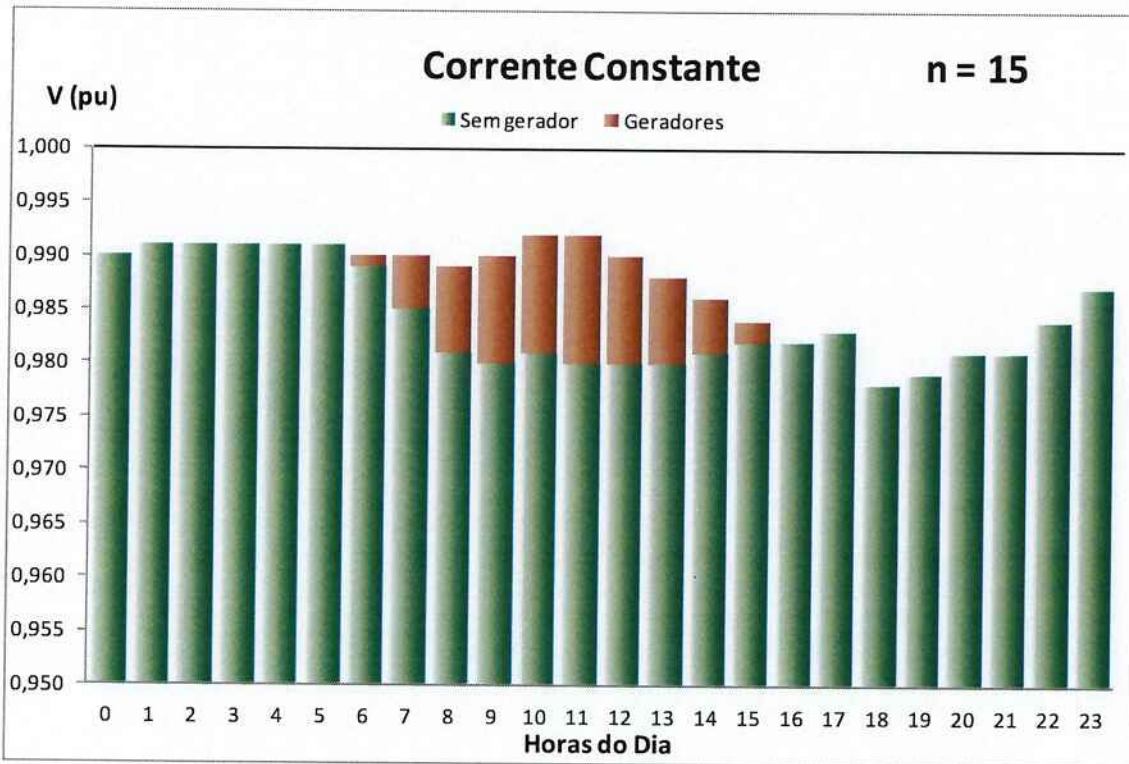


Figura 48 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 15.

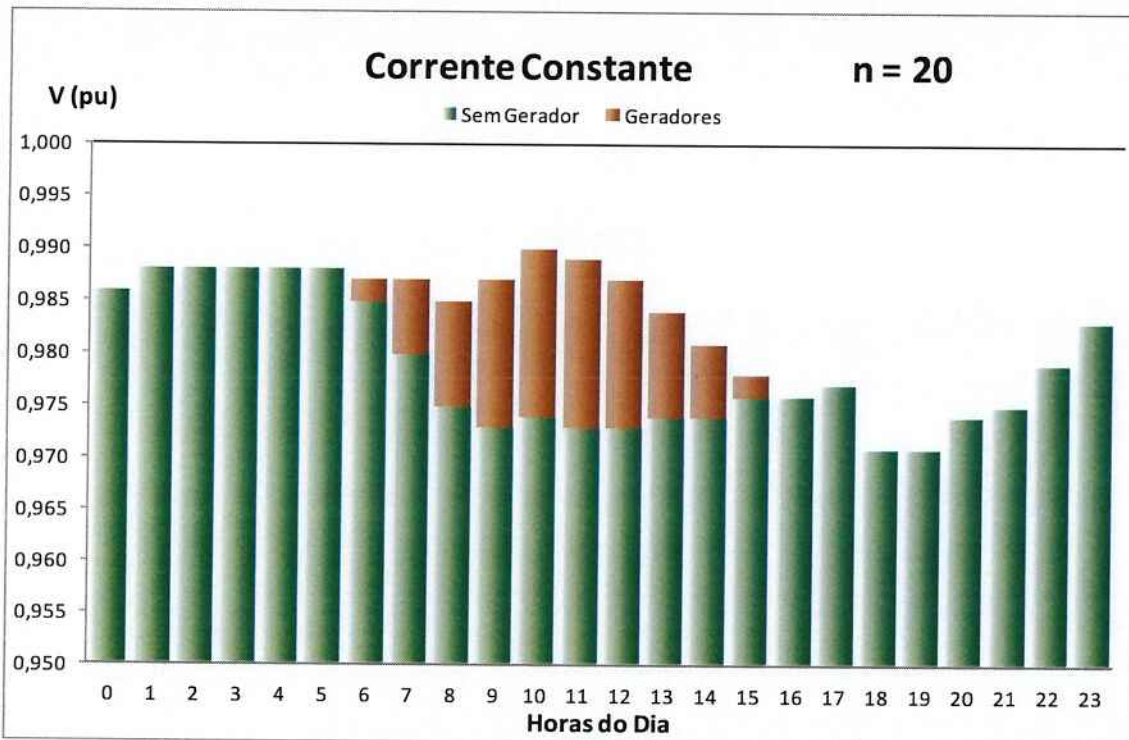


Figura 49 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 20.

4.4.2 - Influência do gerador no nível de tensão para carga do tipo potência constante

Assim como no item anterior, foram feitas simulações semelhantes para se analisar a influência do gerador no nível de tensão da barra 3', com a diferença de que a carga modelada neste caso é do tipo potência constante.

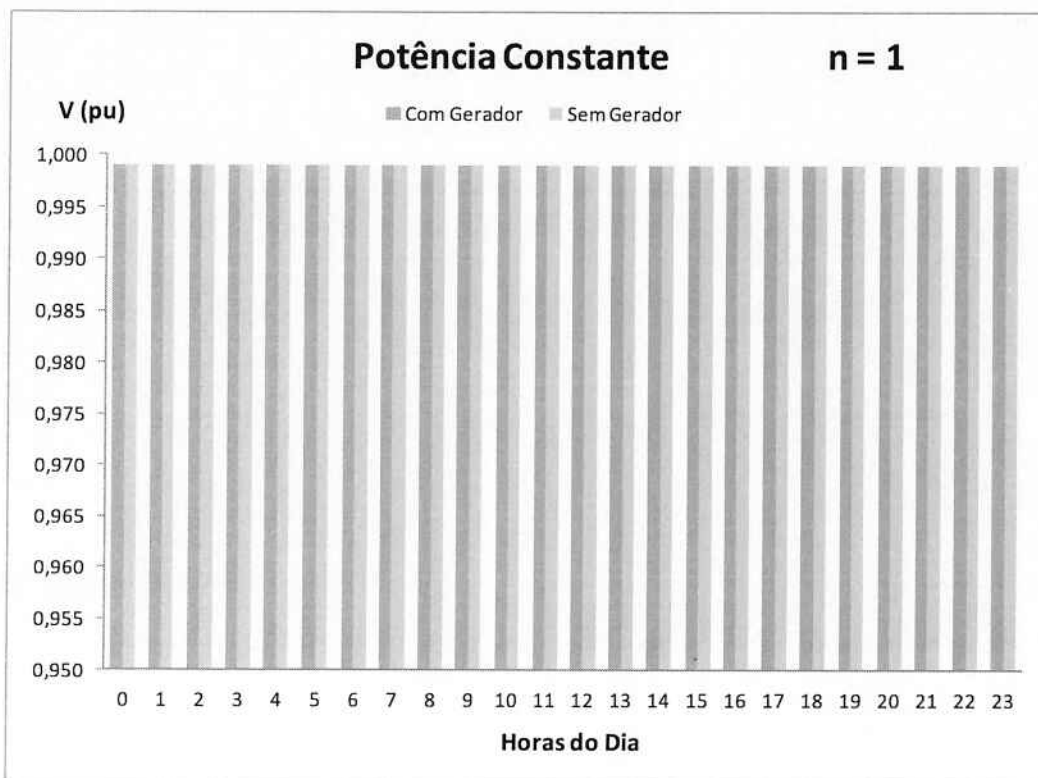


Figura 50 - Modelo reduzido, potência constante para n = 1.

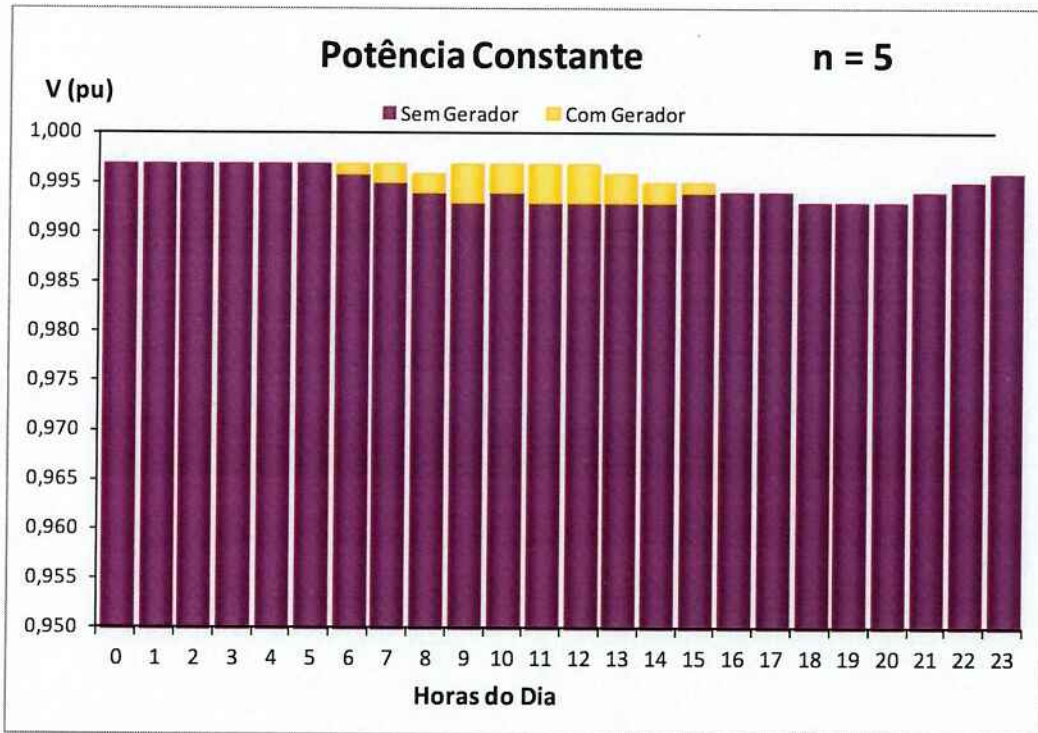


Figura 51 - Modelo reduzido, potência constante para n = 5.

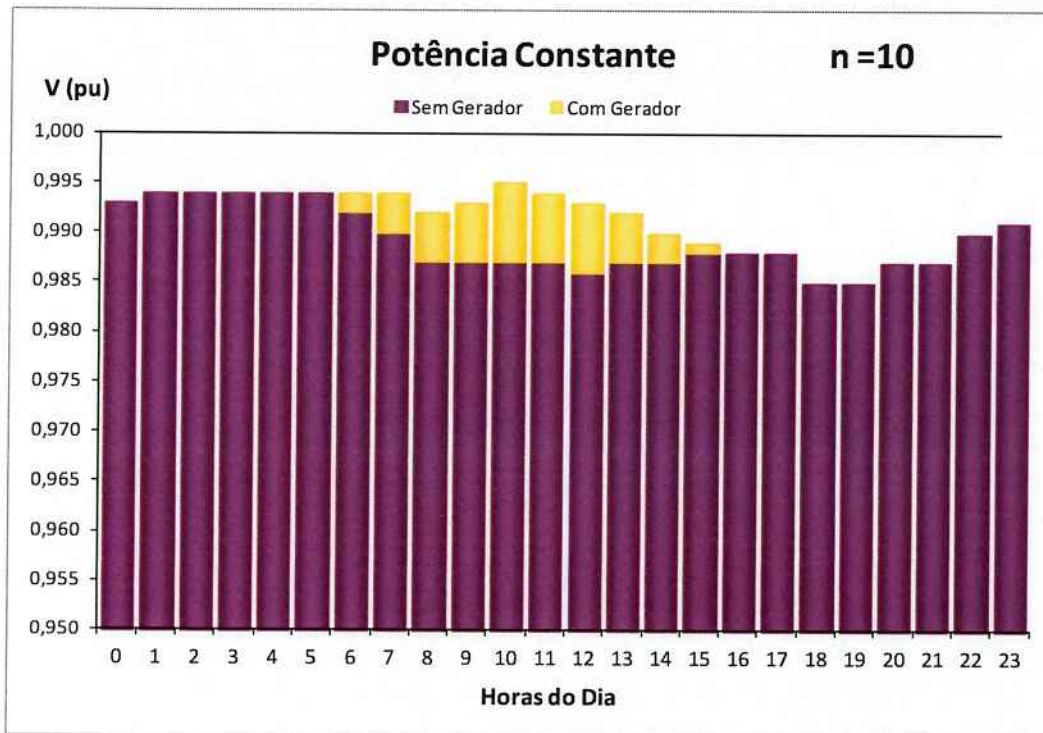


Figura 52 - Modelo reduzido, potência constante para n = 10.

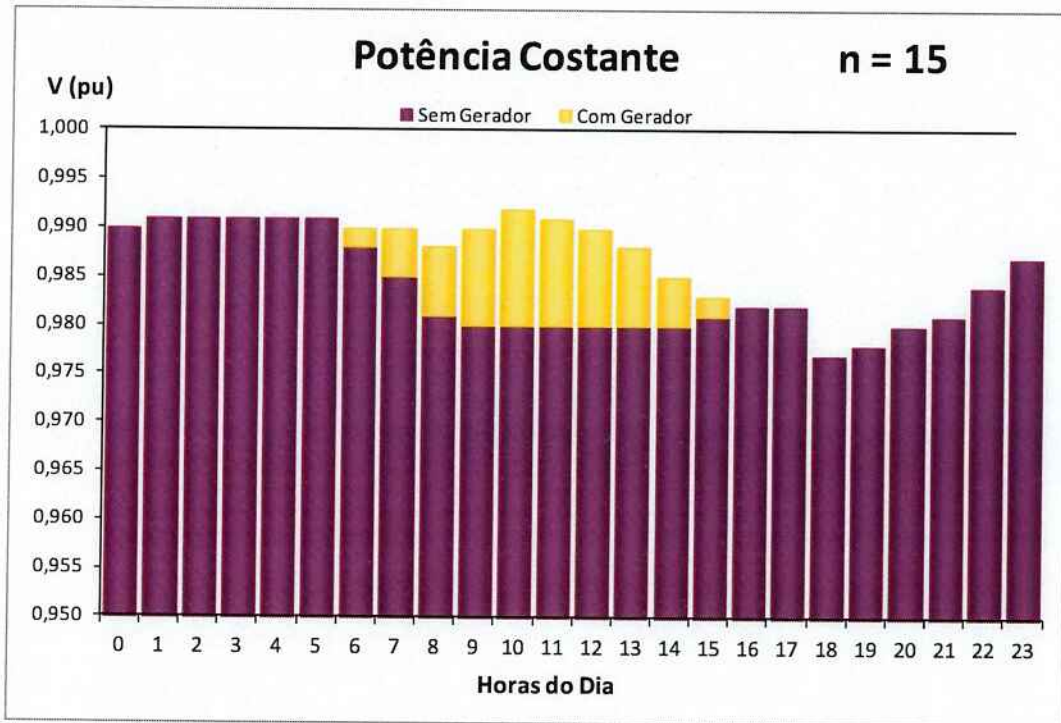


Figura 53 - Modelo reduzido, potência constante para n = 15.

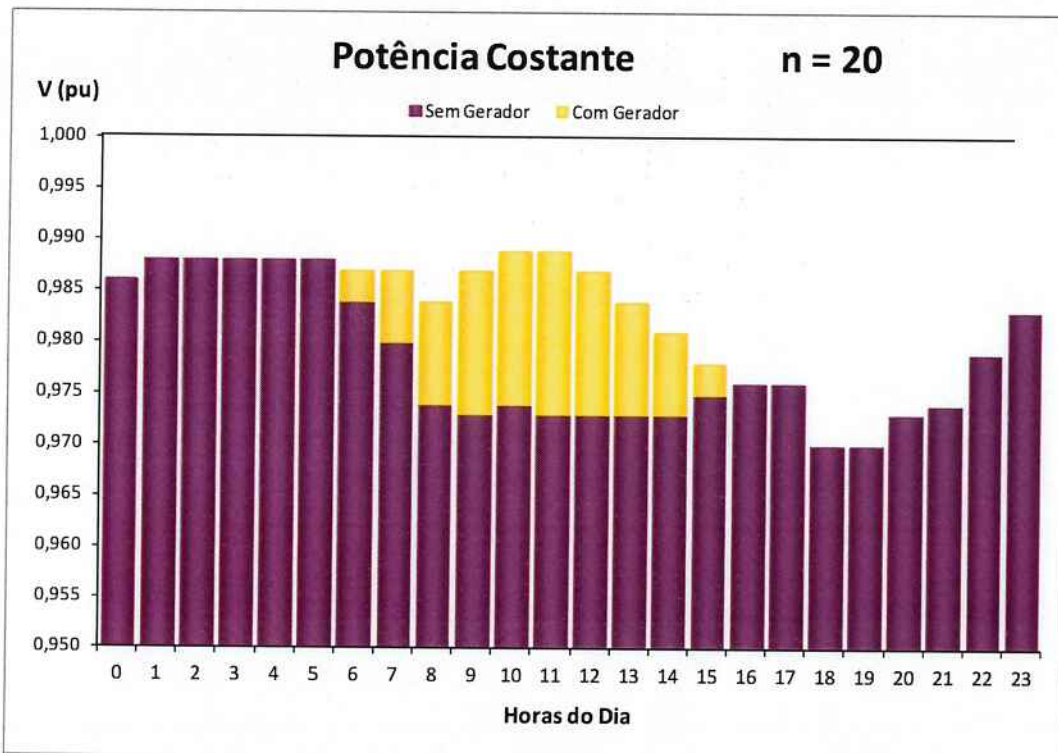


Figura 54 - Modelo reduzido, potência constante para n = 20.

4.4.3 - Influência Do Gerador No Nível De Tensão Para Carga Do Tipo Impedância Constante

Assim como nos itens anteriores, foram feitas simulações semelhantes para se analisar a influência do gerador no nível de tensão da barra 3', com a diferença de que a carga modelada neste caso é do tipo impedância constante.

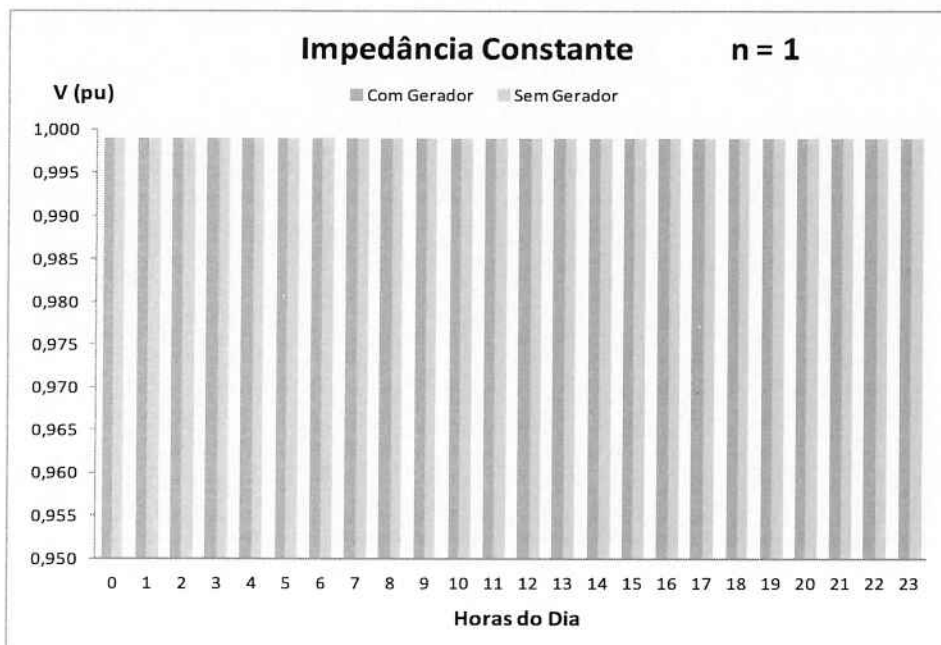


Figura 55 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 1.

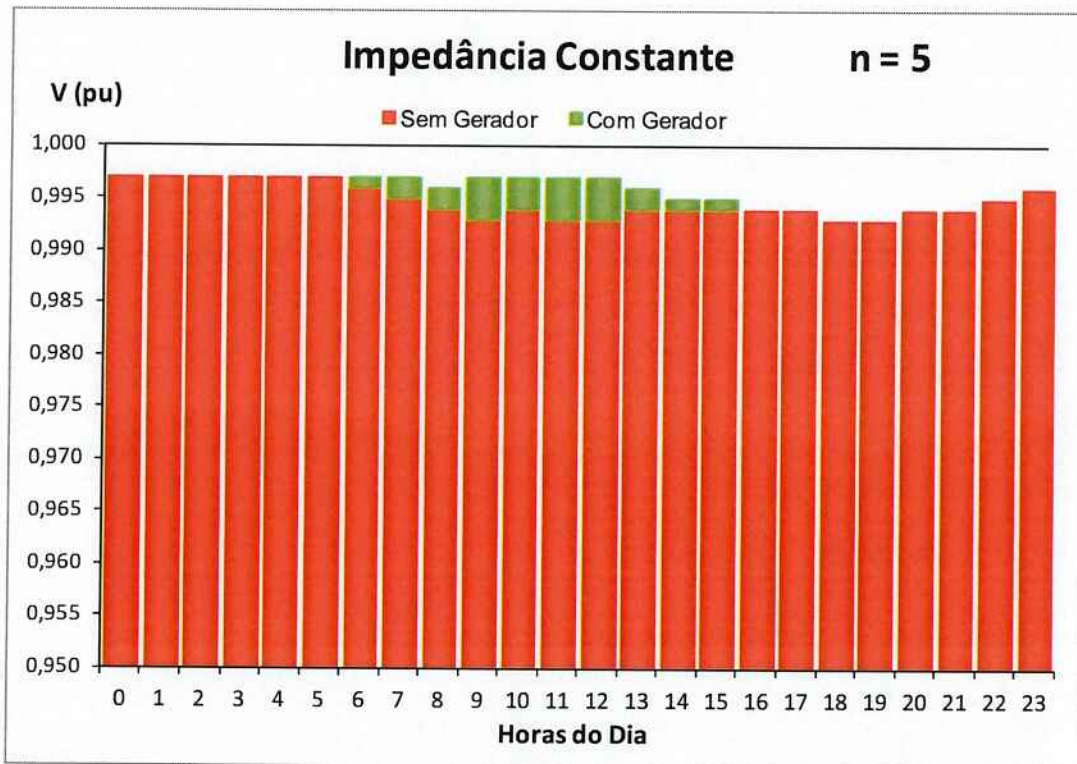


Figura 56 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 5.

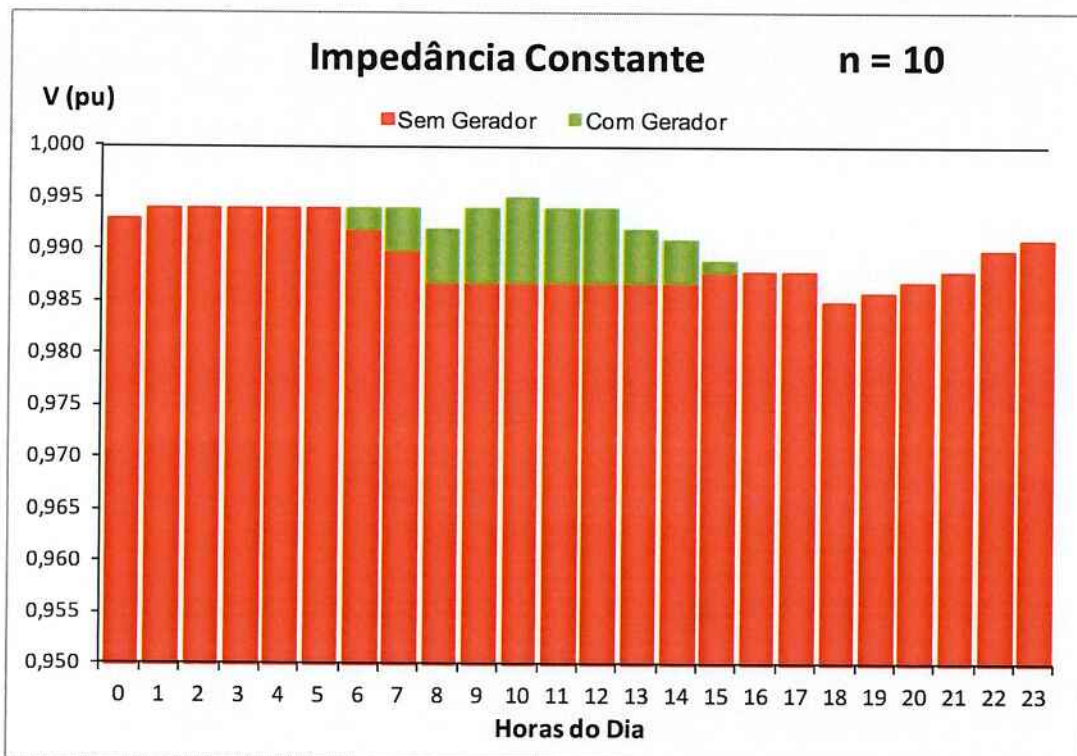


Figura 57 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 10.

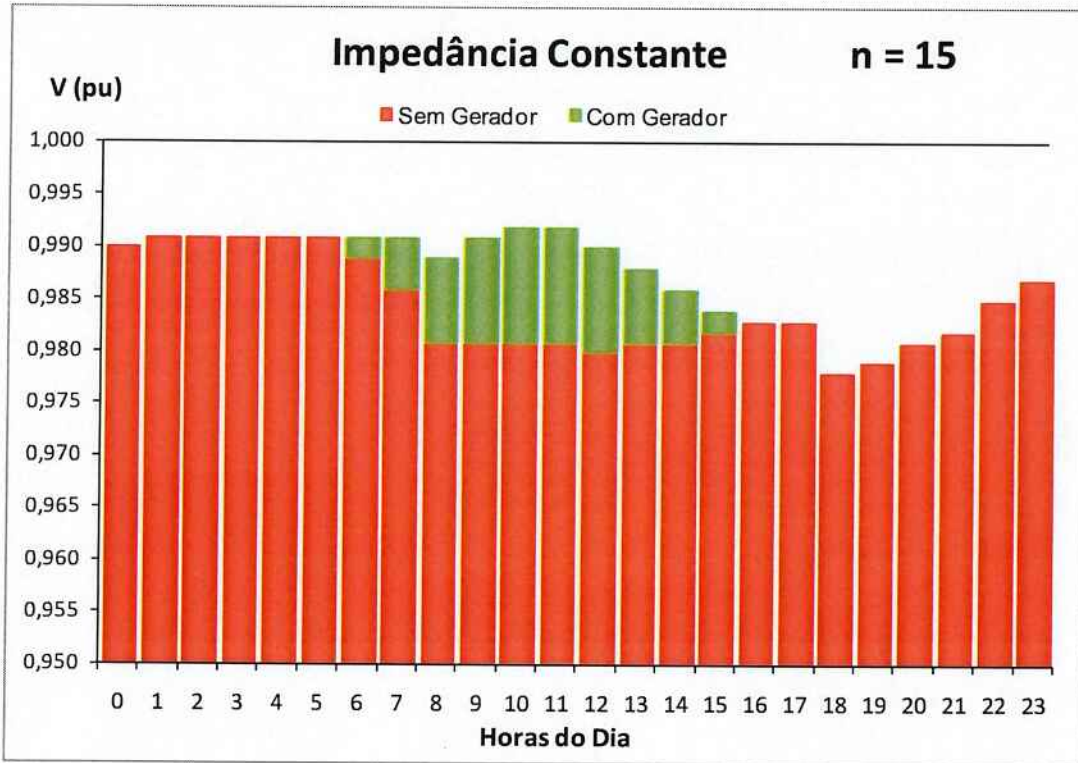


Figura 58 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 15.

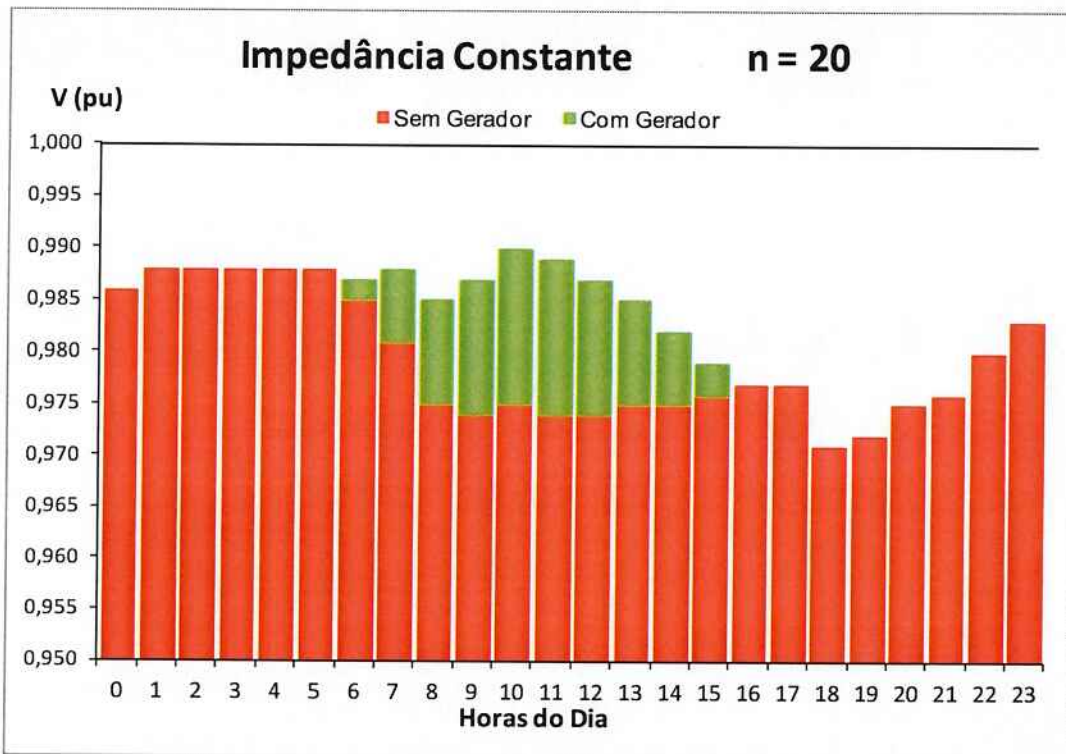


Figura 59 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 20.

4.5 - Análise De Representação Da Carga

Todos os casos foram estudados para três tipos de carga, corrente constante, potência constante e tensão constante.

As diferenças para os tipos de carga estão representadas no gráfico da figura 17 para $n = 20$, aplicados no modelo reduzido.

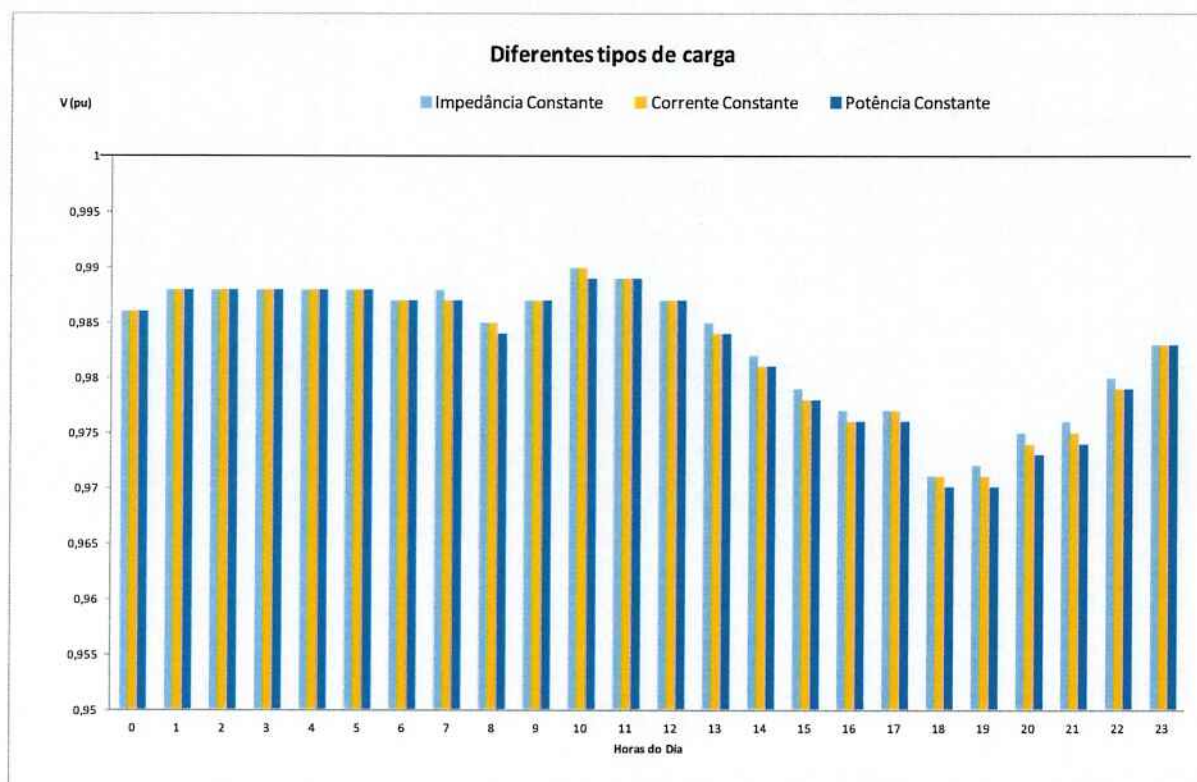


Figura 60 - Diferentes tipos de carga para $n = 20$.

Como é possível de se observar na figura 17, a diferença entre as representações de corrente constante, impedância constante e potência constante é insignificante.

Analisando os gráficos acima é possível perceber que quanto maior o valor de n maior é a influência do gerador fotovoltaico no nível de tensão na carga. Com tais

gráficos também fica claro que os níveis encontrados respeitam as normas estabelecidas pela ANEEL no Módulo 8 do PRODIST – Procedimentos de Distribuição da ANEEL, que trata da Qualidade de Energia elétrica. Para este caso, onde há cargas e microgerações conectadas à rede em um único ponto, pode-se concluir com estas simulações que o gerador contribui consideravelmente para constituir a curva de tensão nos horários que está gerando, e que dificilmente a geração solar irá influenciar negativamente no nível de tensão. (ANEEL, 2008)

Nota-se que os geradores influem entre 6h e 16h. Porém em geral, a ponta do sistema ocorre entre 18h e 20h, quando não há contribuição dos painéis solares. Uma forma de melhorar o perfil de tensão na ponta do sistema seria através de armazenadores de energia, que forneceriam potência neste horário.

4.6 - Análise das quedas de tensão

Para se estudar as quedas de tensão ao longo do circuito mediu-se a tensão em cada ponto. Desta foram obtidas as quedas no trafo e na linha.

Neste estudo foram feitas simulações para medir a tensão na barra 2, logo após o trafo. Antes do trafo a tensão na barra 1 é igual a tensão de suprimento (1 pu), sendo a que da tensão do trafo obtida pela diferença. O resultado é exatamente a impedância do trafo vezes a corrente que passa por ele. A queda de tensão na linha de transmissão foi medida da mesma maneira, medindo a tensão na barra imediatamente antes e na barra imediatamente depois (barra 2 e barra 3') do modelo reduzido, respectivamente. Para ambos os casos as simulações foram feitas com e sem a utilização da geração solar.

Os gráficos das figuras 61, 62 e 63 demonstram as diferenças entre as tensões dos pontos. Essas diferenças são ocasionadas pelas impedâncias dos equipamentos.

Logo, quanto maior a corrente, maior a queda de tensão. Para efeito de visualização, usou-se a curva das 12h, horário em que a diferença entre consumo e geração solar fotovoltaica está negativa, portanto, temos diferenças mais acentuadas de quedas de tensão com e sem geração fotovoltaica.

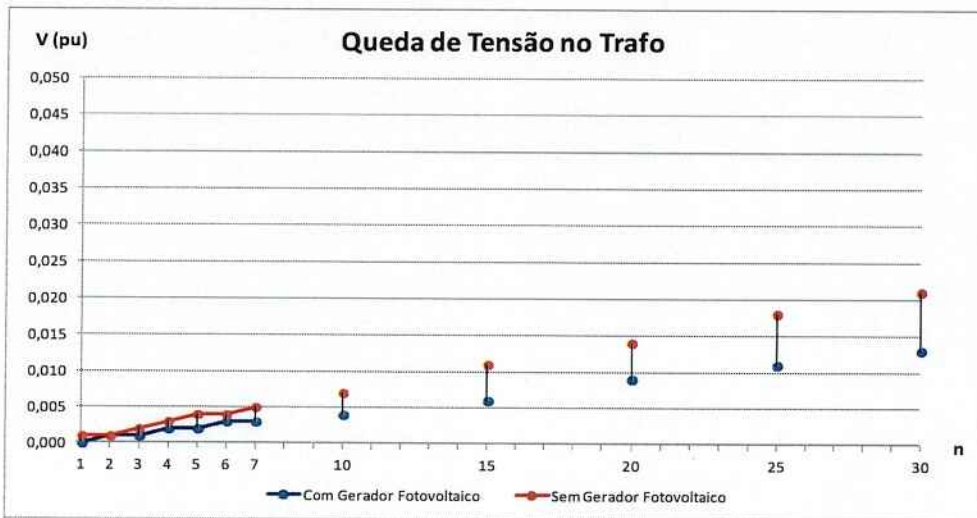


Figura 61 - Queda de Tensão no Trafo

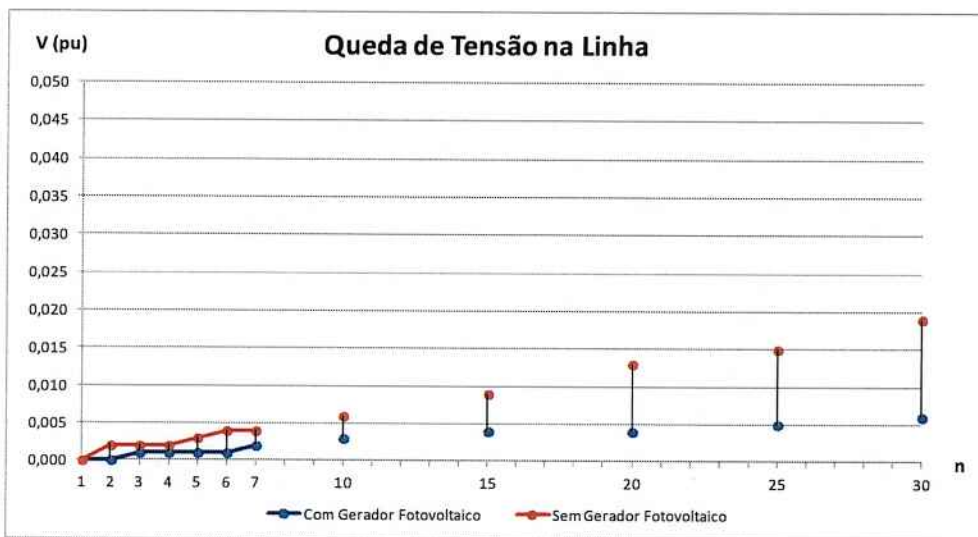


Figura 62 - Queda de Tensão na Linha

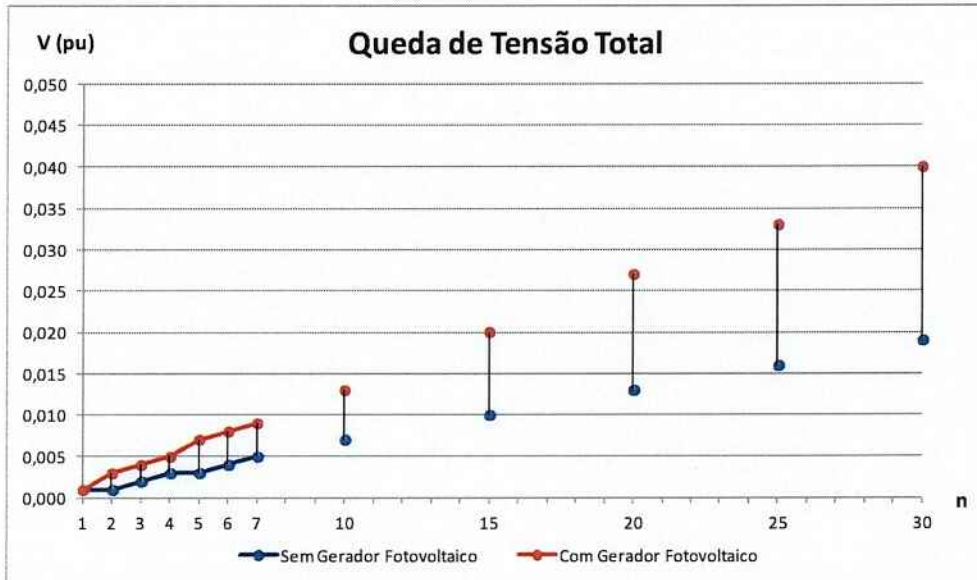


Figura 63 - Queda de Tensão Total

As demais curvas de quedas de tensão para todas as horas em que há geração fotovoltaica estão no Apêndice II, para comparações e estudos das quedas de tensão.

4.7 - Cargas Comerciais E Industriais

Foram também estudadas as curvas de consumidores comerciais e industriais. Para esses consumidores a curva de demanda diária é mais compatível com a geração fotovoltaica. Neste caso o problema de ponta do consumo residencial não aparece, evitando também a necessidade de armazenamento de energia.

5 - Conclusões

Conforme podemos perceber nos casos acima, os valores de tensão estão dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL neste quesito. Mas é importante salientar que isso não garante a integridade da rede. Dependendo do caso, para uma curva de demanda baixa, como pode ser observado em meses de férias, por exemplo, essa geração pode ocasionar um aumento de carregamento na rede. (Braun-Grabolle, 2010)

A conclusão chegada é que embora não tenham havido problemas para uma minirede com geração distribuída em relação aos níveis de tensão, já que os limites estipulados no Módulo 8 de Qualidade de Energia elétrica do PRODIST pela ANEEL são respeitados, há horários em que ocorre a inversão do fluxo de potência. Isso implica em estudos mais profundos sobre os sistemas de proteção, tempos de eliminação de faltas, e simulações de curto circuito. Outra solução seria controle de potência injetada na rede, como há em alguns países. Isso acarretaria em um risco menor tanto para o sistema de distribuição quanto para o próprio consumidor. (Marques, Morán, Abreu, Da Silva, & Freitas, 2004) (Remelgado, 2011)

Com as os gráficos apresentados chega-se a conclusão de que o gerador solar conectado à rede e sem bateria melhora a tensão nos horários entre 6h da manhã e 16 h da tarde, porém não influencia no horário residencial mais crítico que seria às 18h e 19h, onde há o maior afundamento de tensão provocado pelo pico de demanda.

Outro ponto percebido foi o da curva típica das cargas industriais e comerciais. Em locais onde a maior concentração de carga é em Baixa Tensão e com perfil comercial e residencial, a geração fotovoltaica pode ser uma solução, já que sua geração

coincide com a o pico de demanda da curva de consumo desse seguimento, mesmo que essa geração seja residencial.

Deve ser lembrado que áreas com muitas variações climáticas não devem ser levadas em conta geração solar para postergação de investimentos, já que em um período muito nublado a geração pode ficar muita baixa.

5.1 - Trabalhos Futuros

Uma proposta para um possível estudo futuro é analisar o sistema FV com armazenamento de energia para o consumo nos horários de pico do sistema. Uma análise interessante seria calcular o custo benefício de uma transação para a tarifa branca, usando o sistema proposto. A tarifa branca tem custo de energia menor nos horários fora ponta e custo maior nos horários de ponta. Para um consumidor residencial que utilize o consumo da energia armazenada nos horários de ponta, pode haver um tempo de retorno de investimento menor, sendo, portanto, uma análise interessante a estudar.

6 – Bibliografia

- ABNT CE - 03:082.01 (Pinto, Aimé; Belt, Ildo). *Normas ABNT de inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)*.
- ANEEL. (2011). Nota Técnica Nº 0025/2011.
- ANEEL. (2008). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.
- ANEEL. (2011). *Projetos Cadastrados no P&D Estratégico n. 13/2011 - “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira*. Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE.
- Borges, C. M. (2007). *Energia, capitalismo inclusivo e desenvolvimento sustentável: chaves para a quebra de uma paradigma*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Braun-Grabolle, P. (2010). *A integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em larga escala no sistema de distribuição urbana*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico, Florianópolis.
- CRESESB. (s.d.). Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito: <http://www.cresesb.cepel.br>
- De Oliveira, S. H. (2002). *Geração distribuída de eletricidade; Inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2012). *Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira*. Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisas Energéticas. (2012). *Balanço Energético Nacional, Resultado Preliminar ano base 2011*. Rio de Janeiro.
- Fadigas, P. E. “*Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica*”.
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). *Energia e meio ambiente no Brasil*. São Paulo.
- Instituto Nacional de Eficiência Energética. (s.d.). *Geração Distribuída e Cogeração*. Fonte: <http://www.inee.org.br>

International Energy Initiative para a América Latina (IEI-LA). (2009). *Avaliação dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes - SIGFI's*. Campinas, SP, Brasil.

Lopes, J. A. (2007). *Microgeração e Microredes*. Universidade do Porto, Porto.

Macedo, W. N. (2006). *Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado s sistemas fotovoltaicos conectados à rede*. Tese de Doutorado, USP, São Paulo.

Mallwitz, R., & Engel, B. (2010). *Solar Power Inverters*. Nuremberg/Germany.

Marques, F. A., Morán, J. A., Abreu, L., Da Silva, L. C., & Freitas, W. (2004). *Impáctos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Nor, K. M., Syafii, & Abdel-Akher, M. (2010). *Grid-Connected Photovoltaic Models for Three-Phase*. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE.

Patel, M. R. (1999). *Wind and Solar Power System*. New York: Boca Raton.

Ramos, C. D. (2006). *Procedimentos de Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos*. Tese (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo.

Rauschenbach, H. S. (1980). *Solar Cell Array Design Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Remelgado, P. A. (2011). *Controlo da Potência Activa Injectada na Rede por um Sistema de Microgeração do Tipo Solar Fotovoltaico*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

REN21 Secretariat. (2011). *Renewables 2011 Global Status Report*. Paris.

REN21 Secretariat. (2012). *Renewables 2012 Global Status Report*. Paris.

Swera. (2006). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*.

Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. IEEE.

Zilles, P. R. (2011). *Geração Distribuída e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Assembléia Geral Ordinária, Associação da Indústria de Cogeração de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

7 – Anexos

Anexo I – Média Sazonal da Radiação Solar Global Brasileira

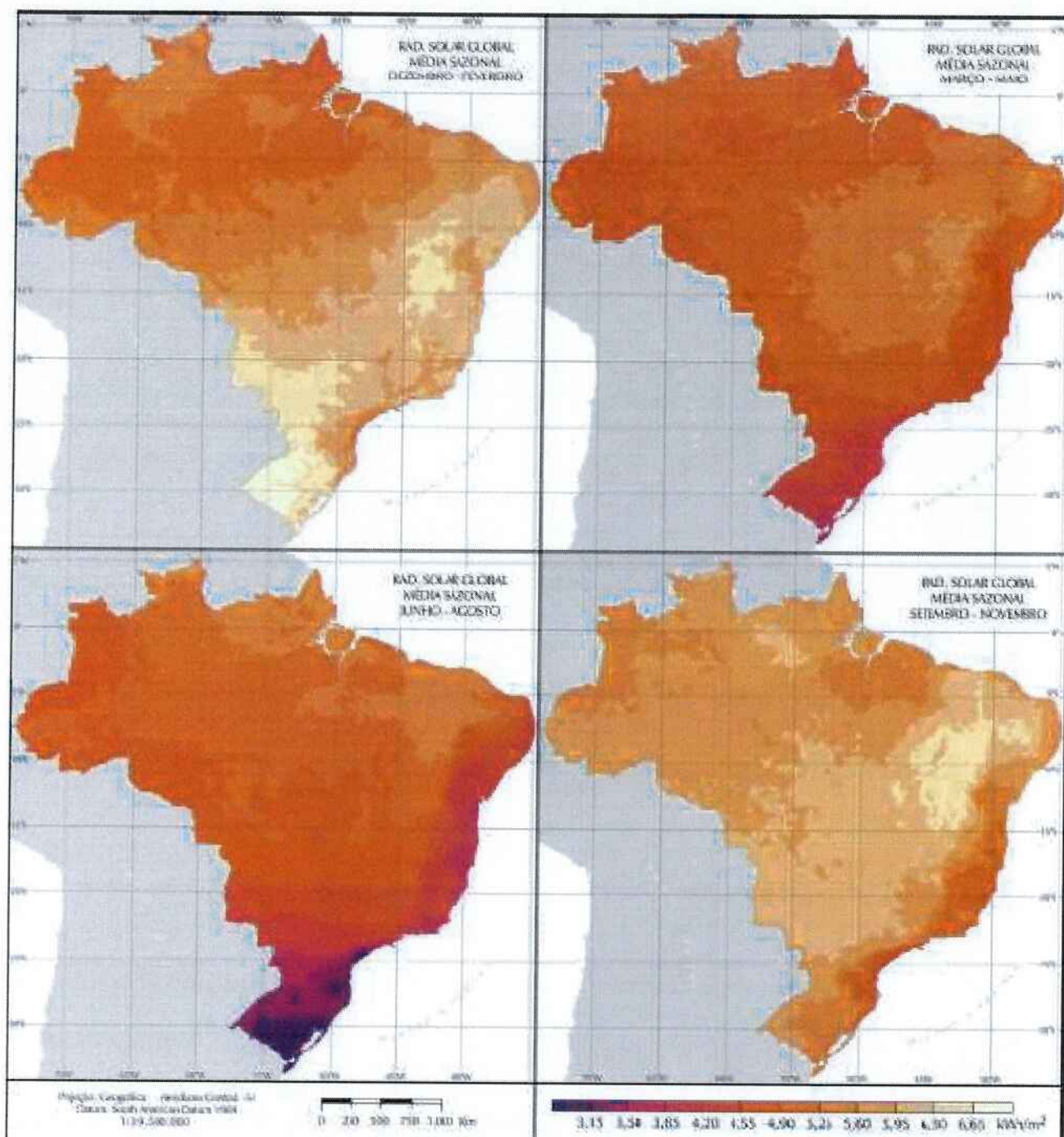


Figura 64 - Média Radiação Solar Global Brasileira Sazonalizada

8 – Apêndices

Apêndice A – Gráficos de Estudo Da Tensão na Barra 3' Do Modelo

Reduzido para $n=2$, $n=3$, $n=4$, $n=6$, $n=7$, $n=25$ e $n=30$ para os 3 tipos de carga.

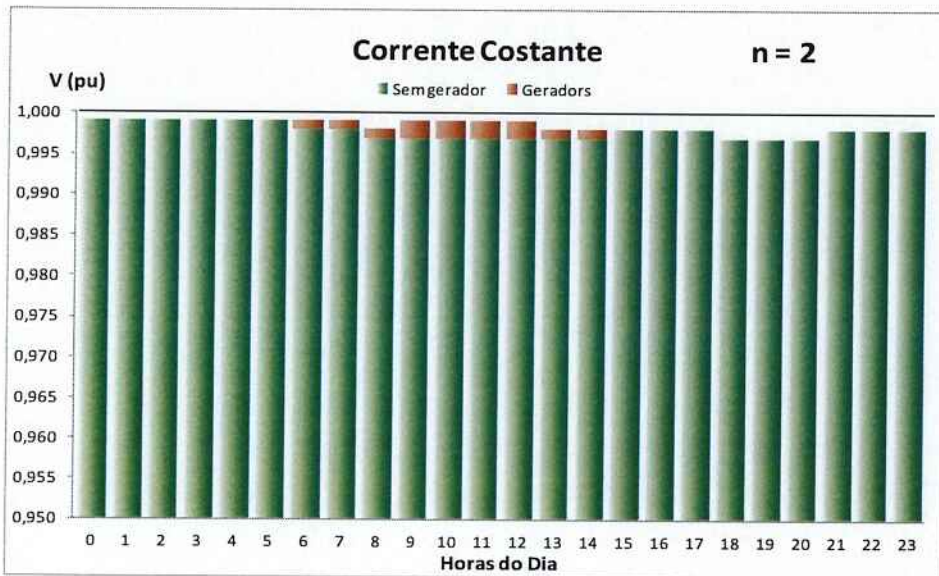


Figura 65 - Modelo reduzido, corrente constante para $n = 2$.

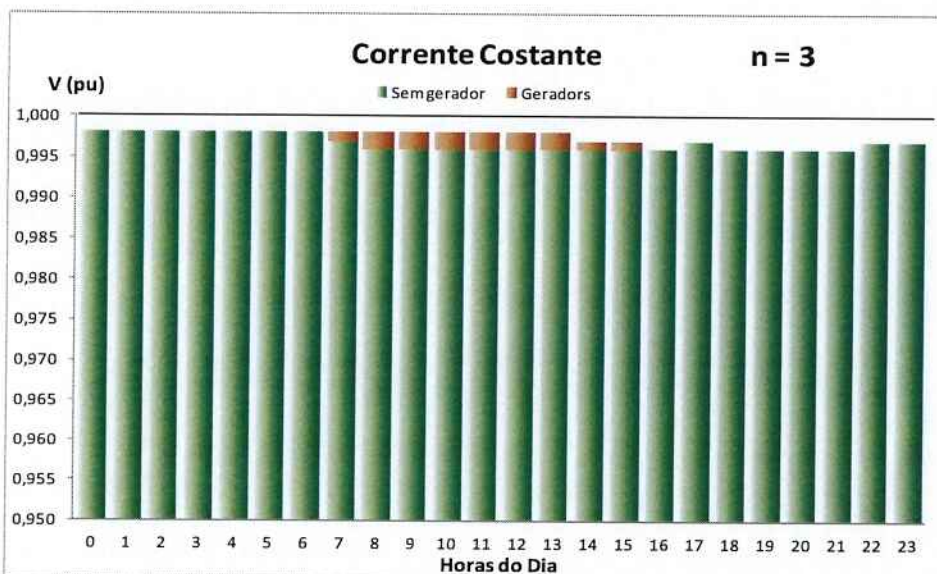


Figura 66 - Modelo reduzido, corrente constante para $n = 3$.

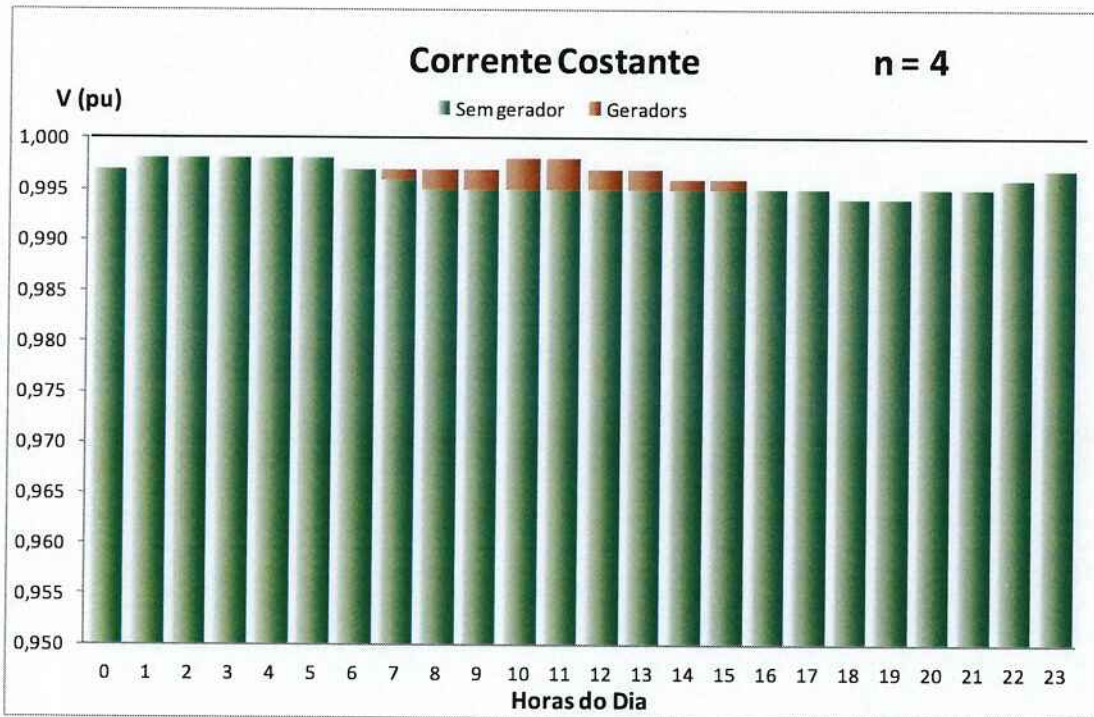


Figura 67 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 4.

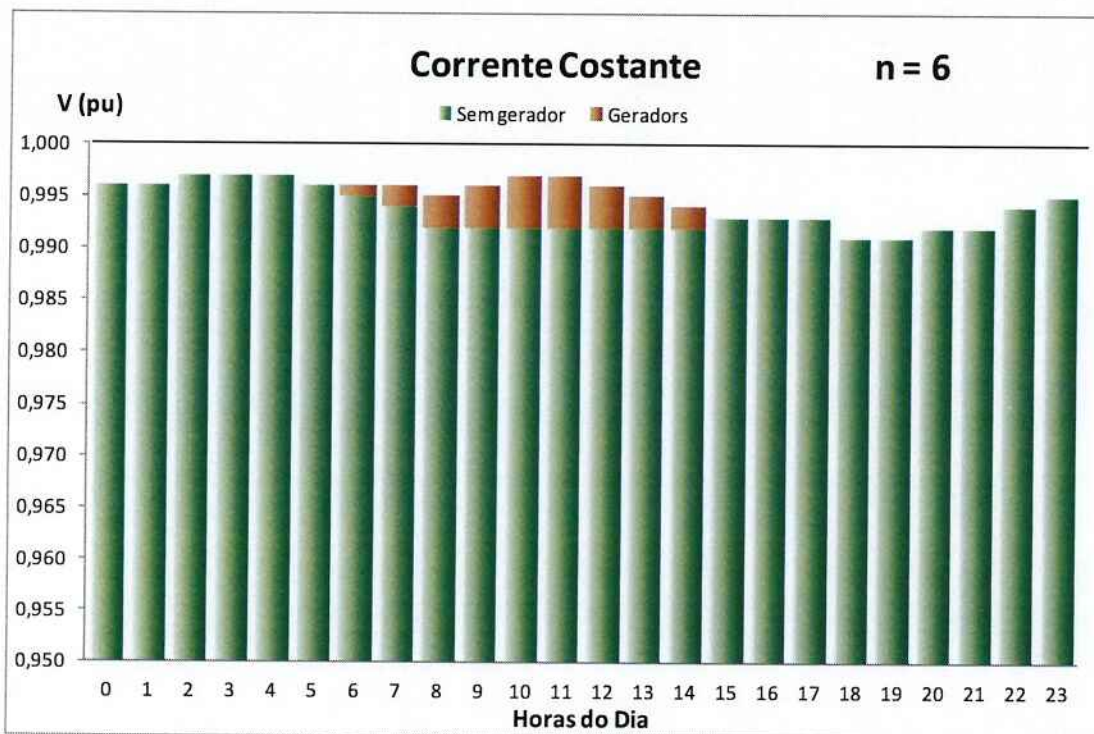


Figura 68 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 6.

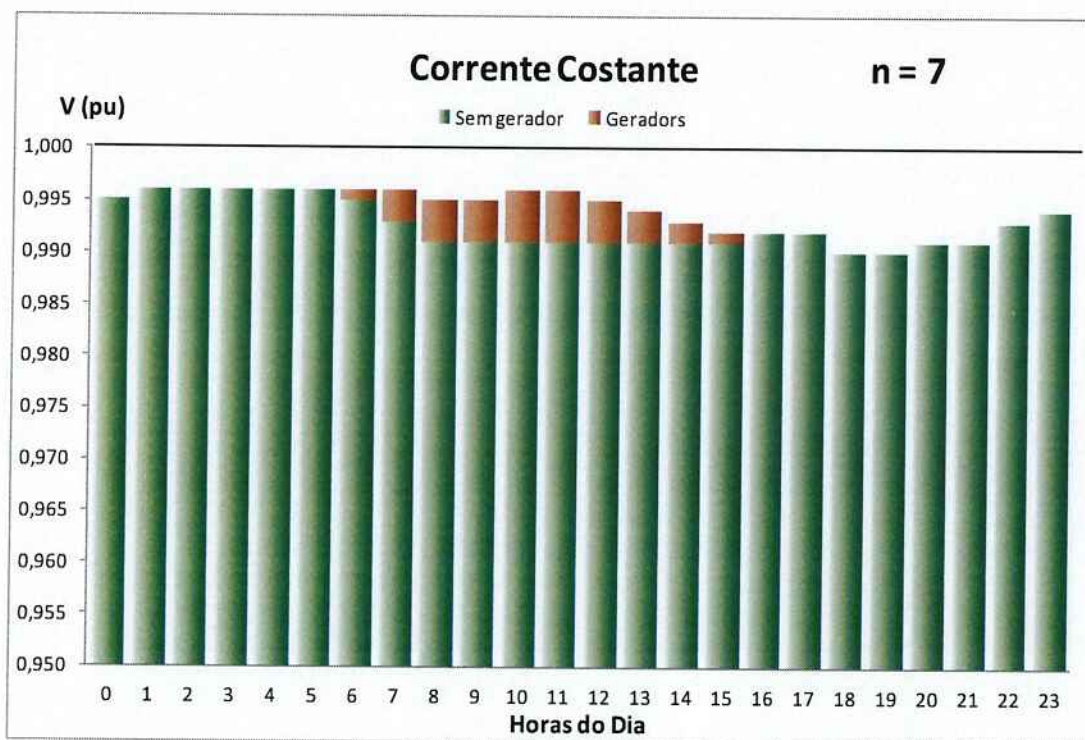


Figura 69 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 7.

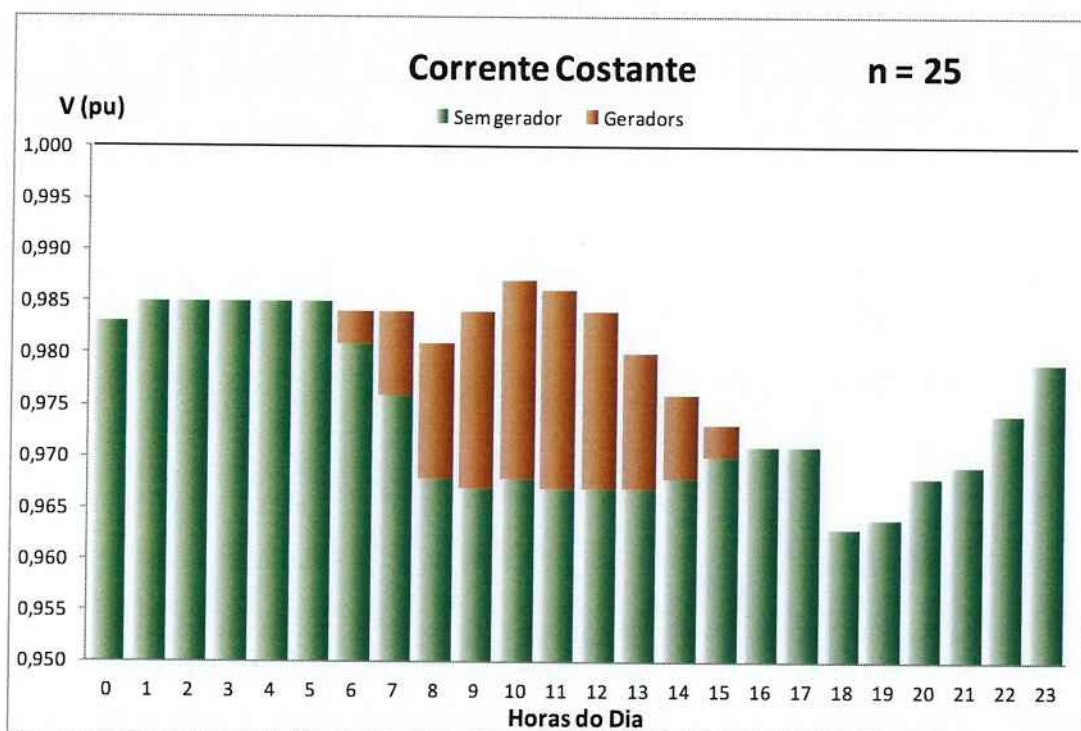


Figura 70 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 25.

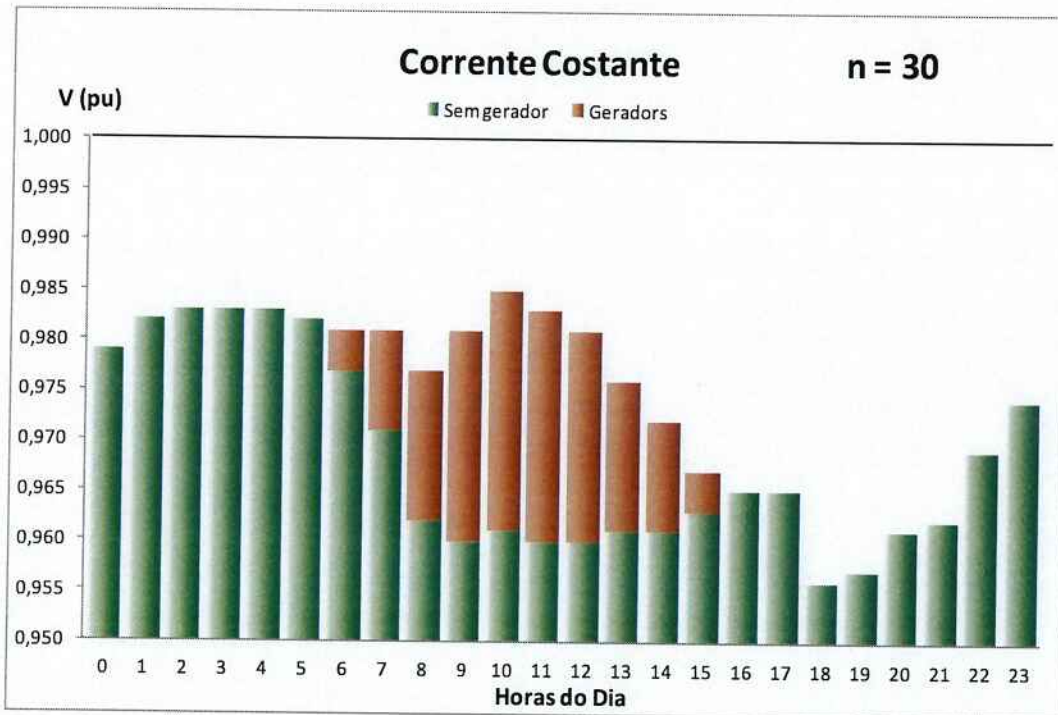


Figura 71 - Modelo reduzido, corrente constante para n = 30.

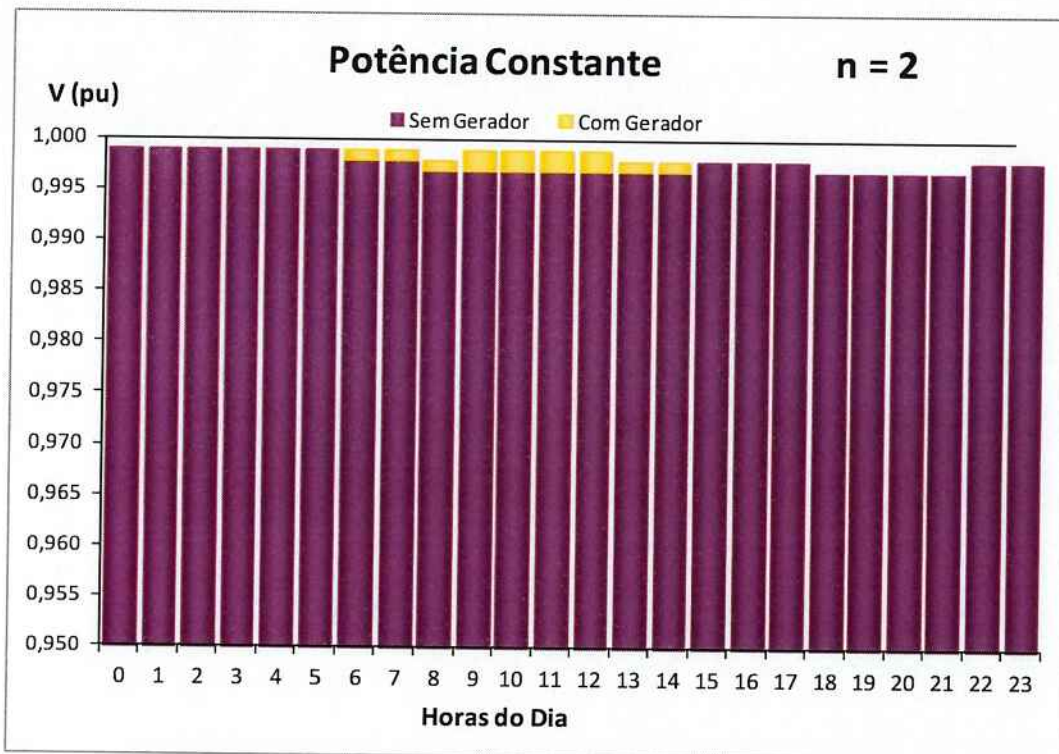


Figura 72 - Modelo reduzido, potência constante para n = 2.

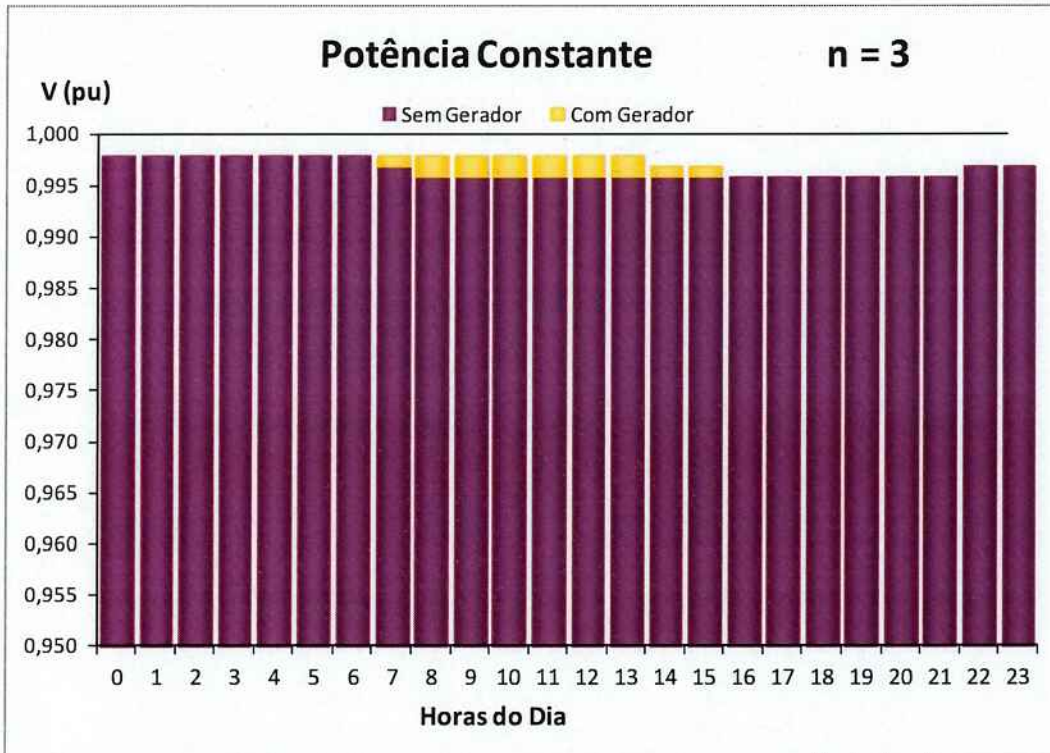


Figura 73 - Modelo reduzido, potência constante para n = 3.

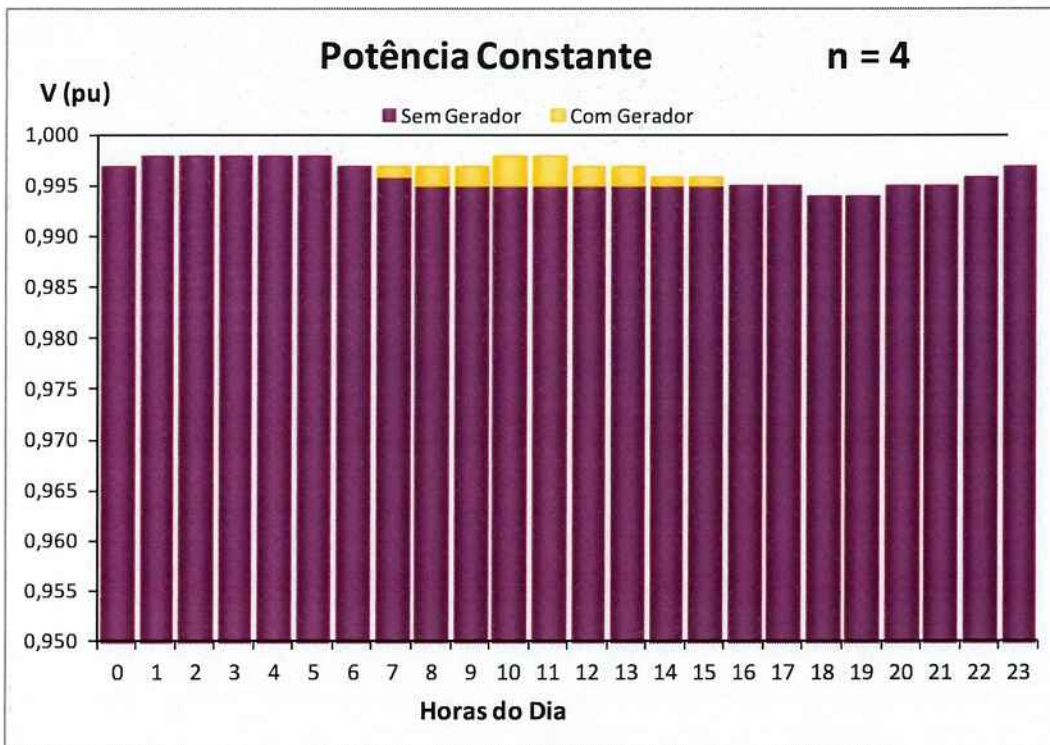


Figura 74 - Modelo reduzido, potência constante para n = 4.

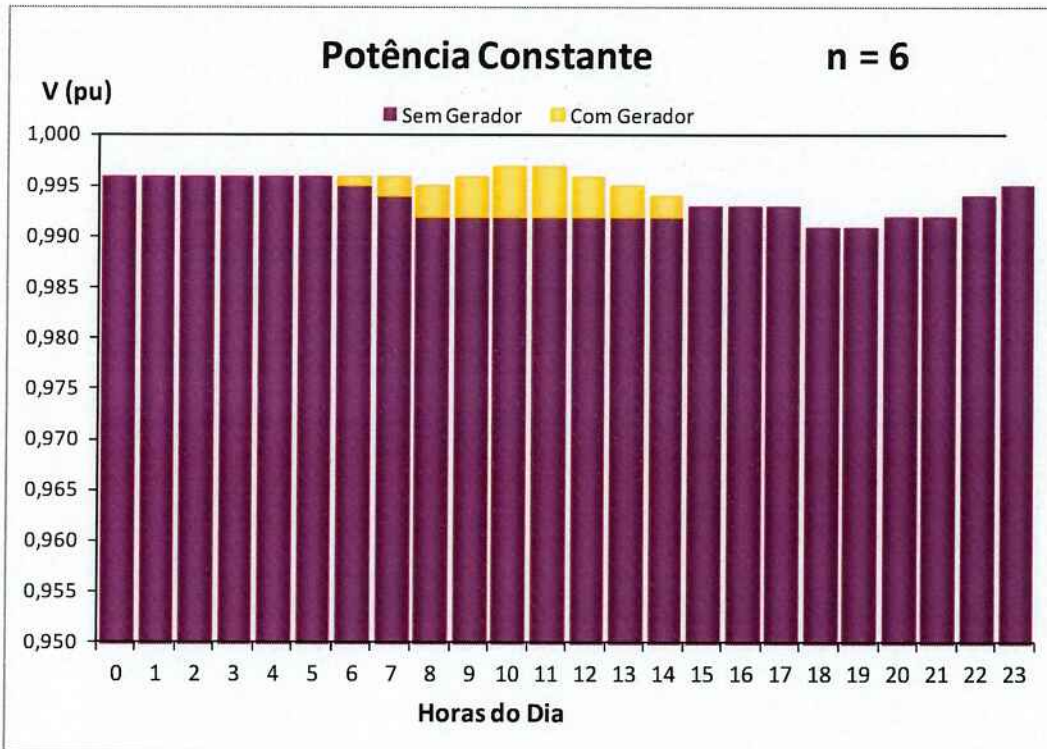


Figura 75 - Modelo reduzido, potência constante para n = 6.

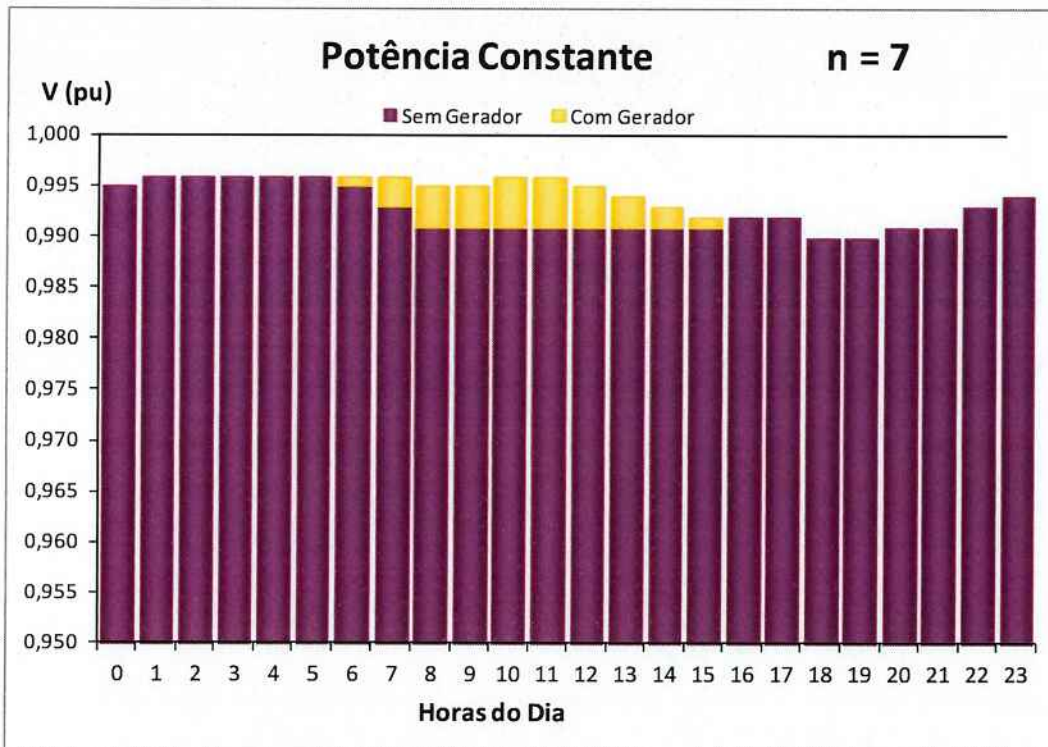


Figura 76 - Modelo reduzido, potência constante para n = 7.

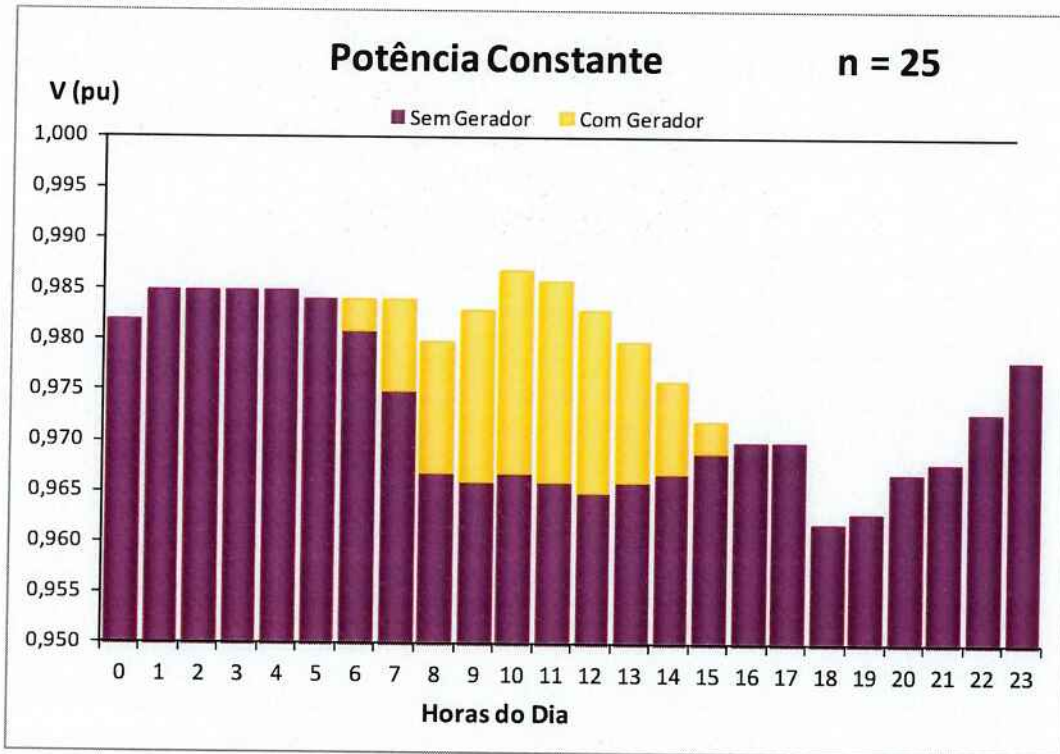


Figura 77 - Modelo reduzido, potência constante para n = 25.

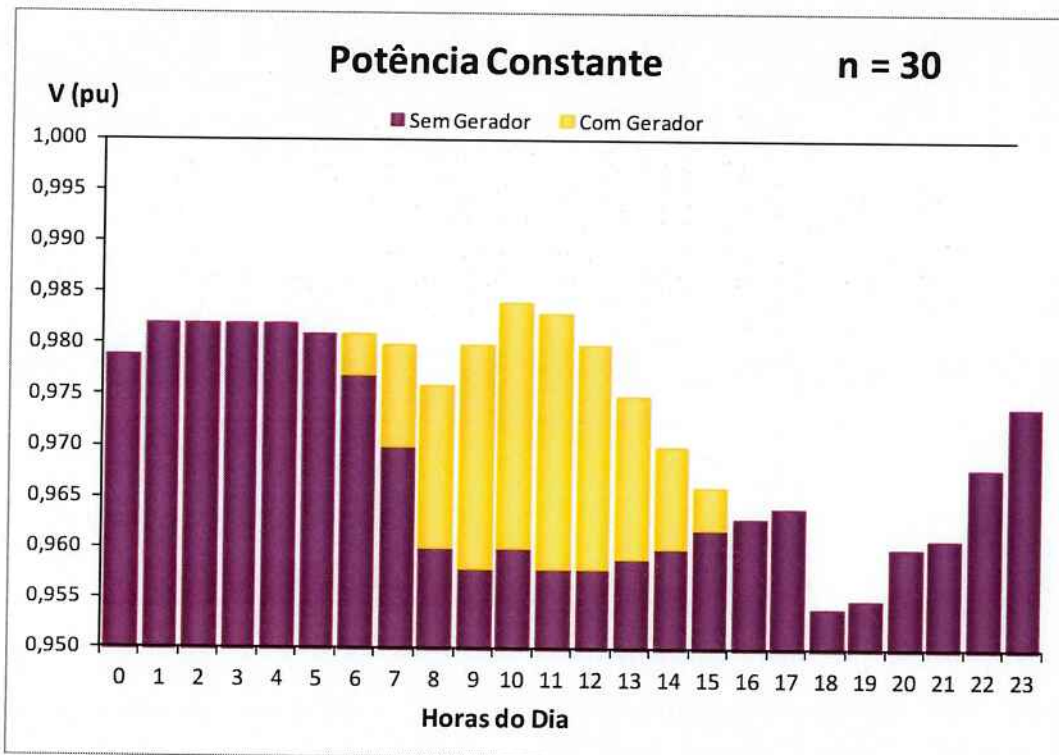


Figura 78 - Modelo reduzido, potência constante para n = 30.

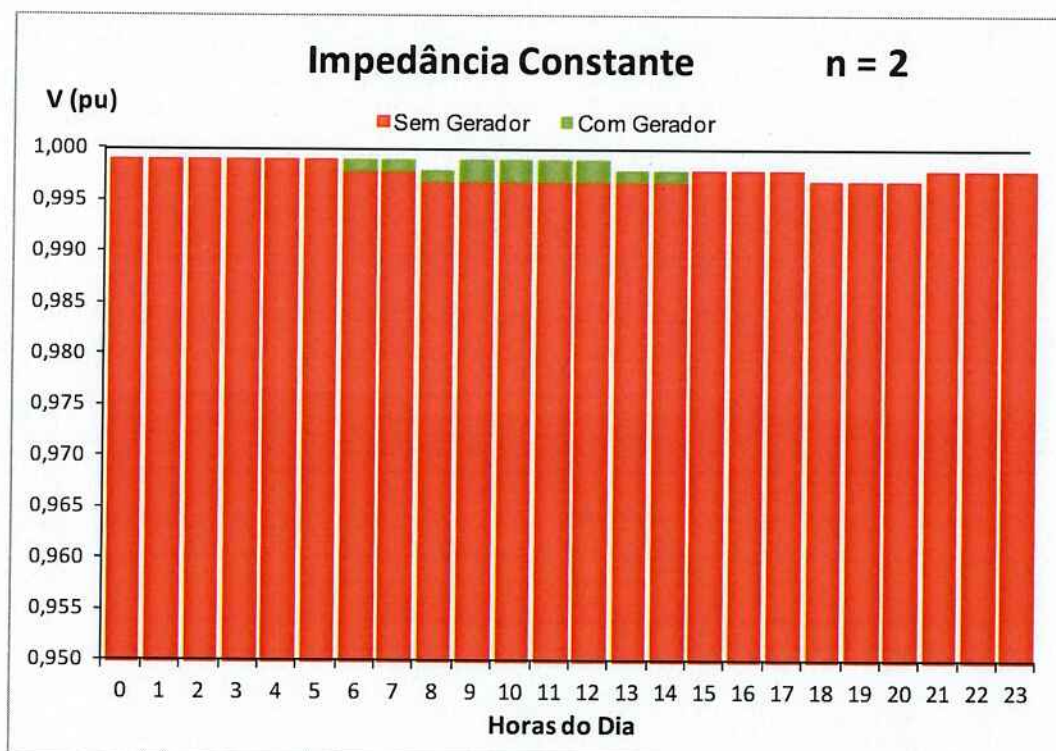


Figura 79 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 2.

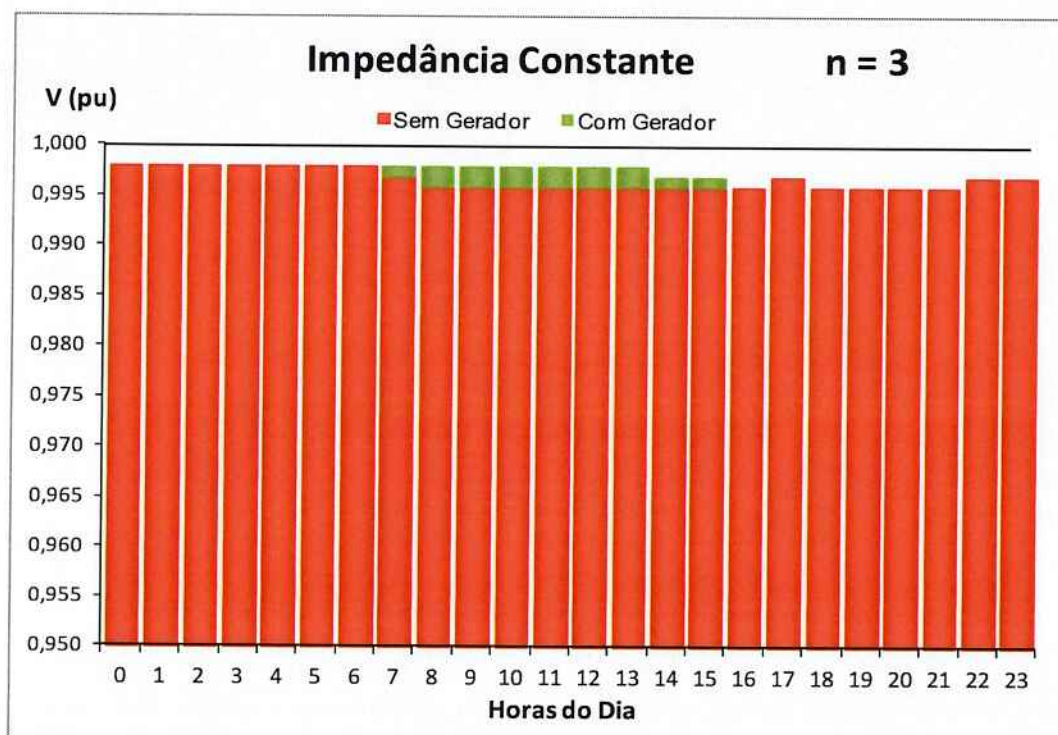


Figura 80 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 3.

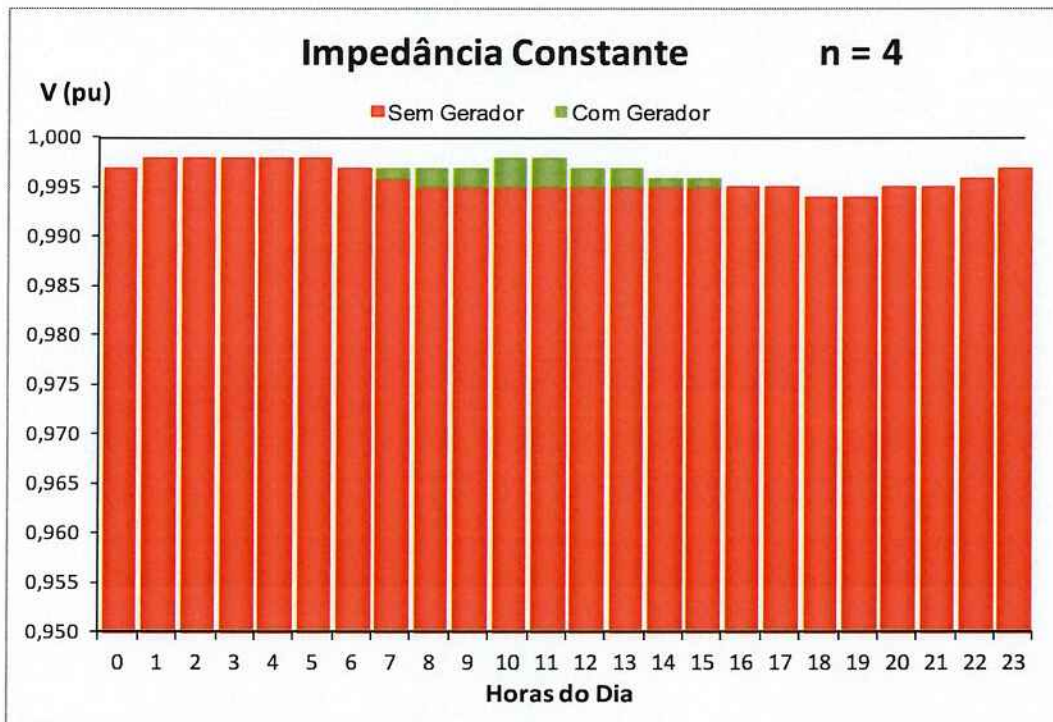


Figura 81 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 4.

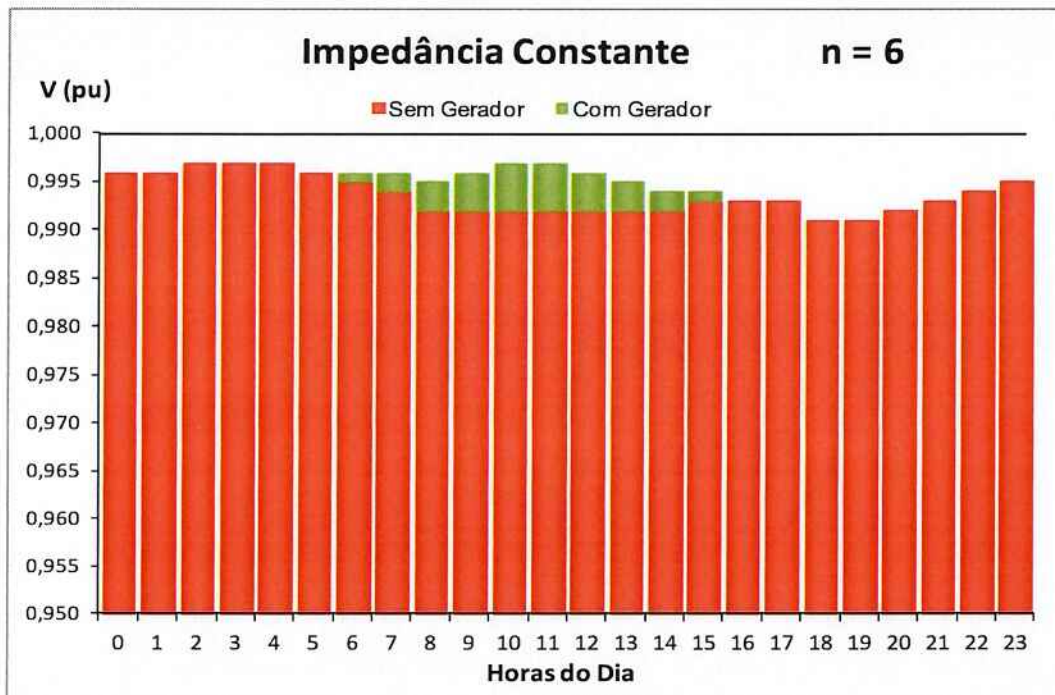


Figura 82 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 6.

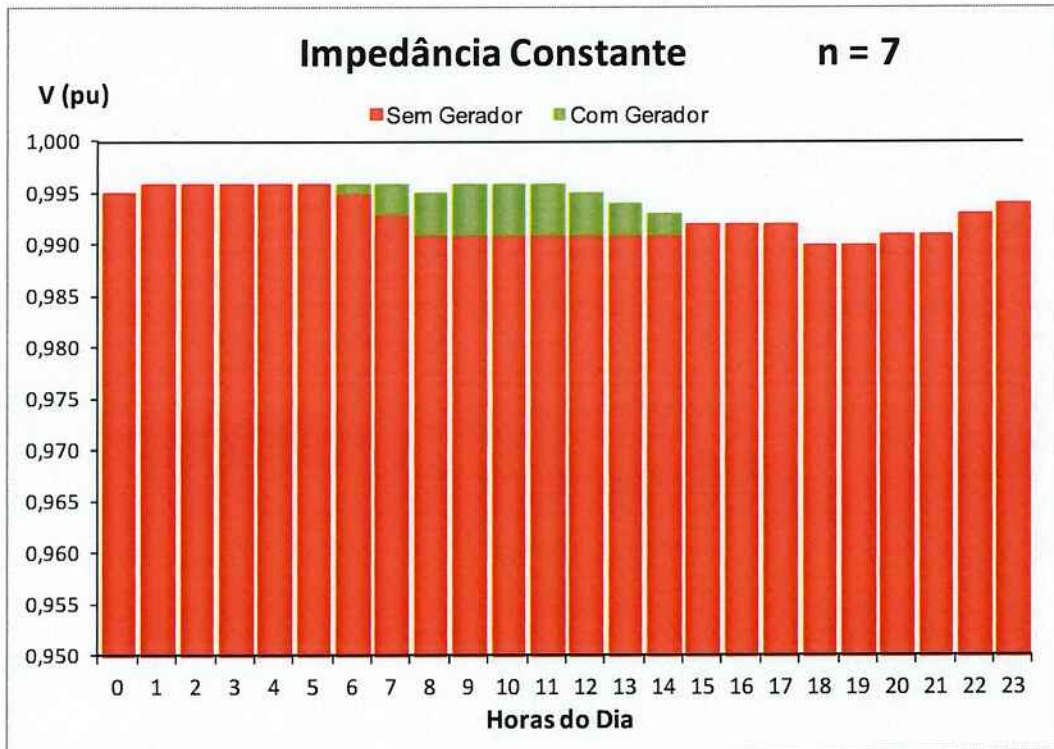


Figura 83 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 7.

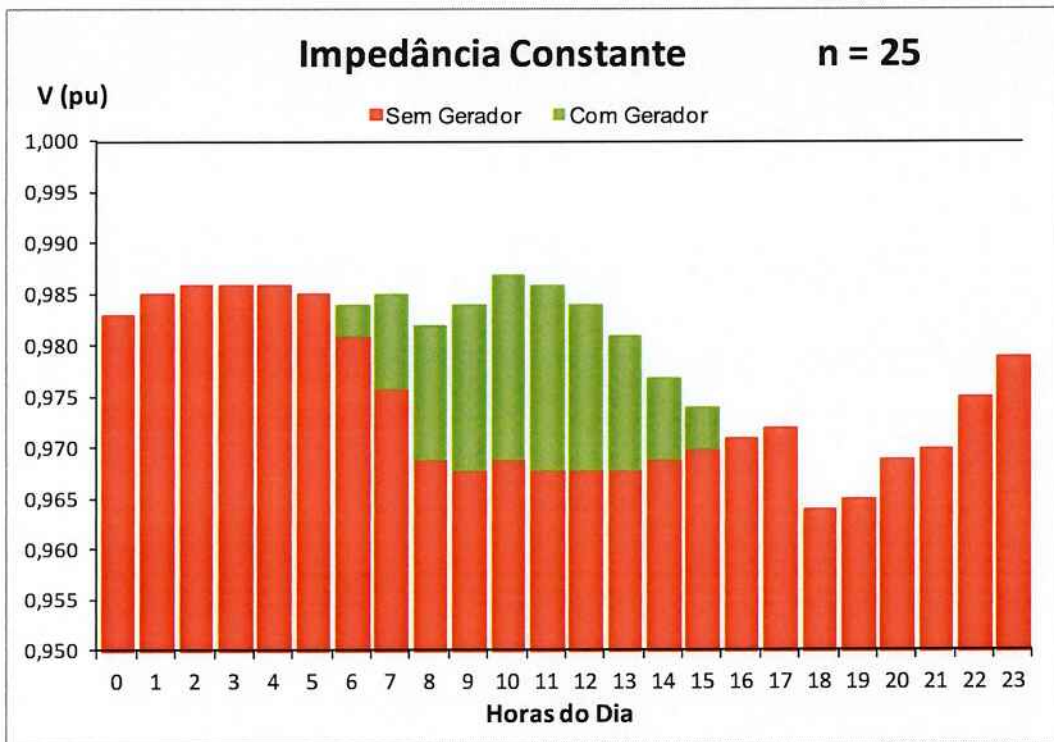


Figura 84 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 25.

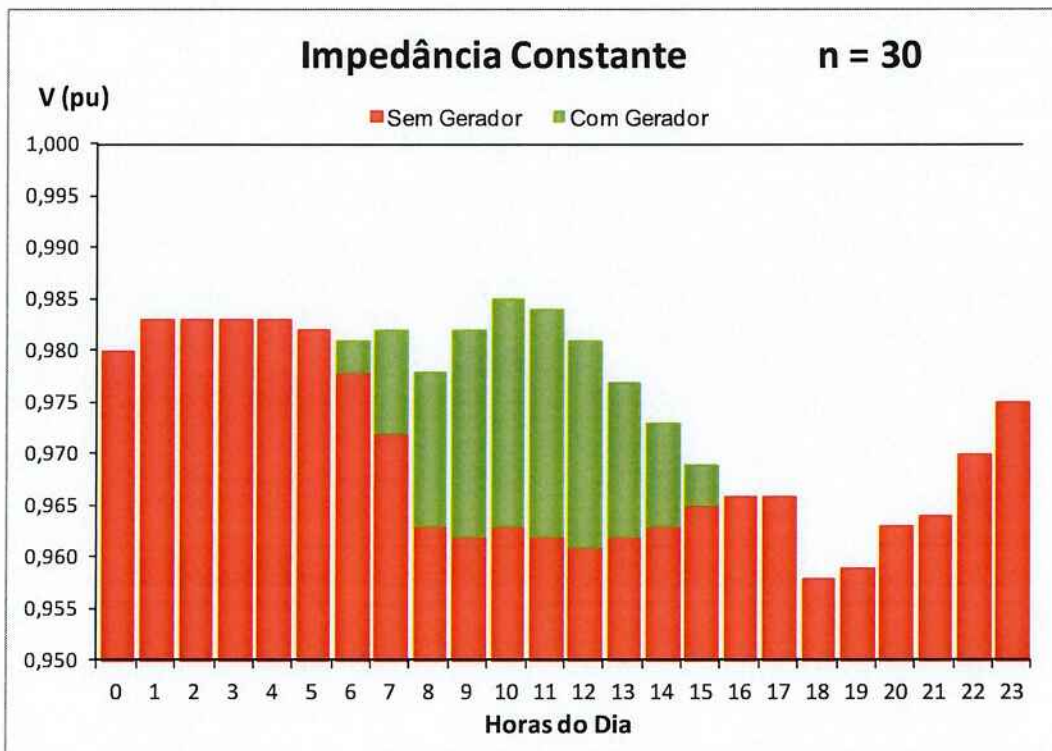


Figura 85 - Modelo reduzido, impedância constante para n = 30.

Apêndice B – Quedas de Tensão nos Trafos, nas Linhas e Totais.

Hora do Dia = 6h

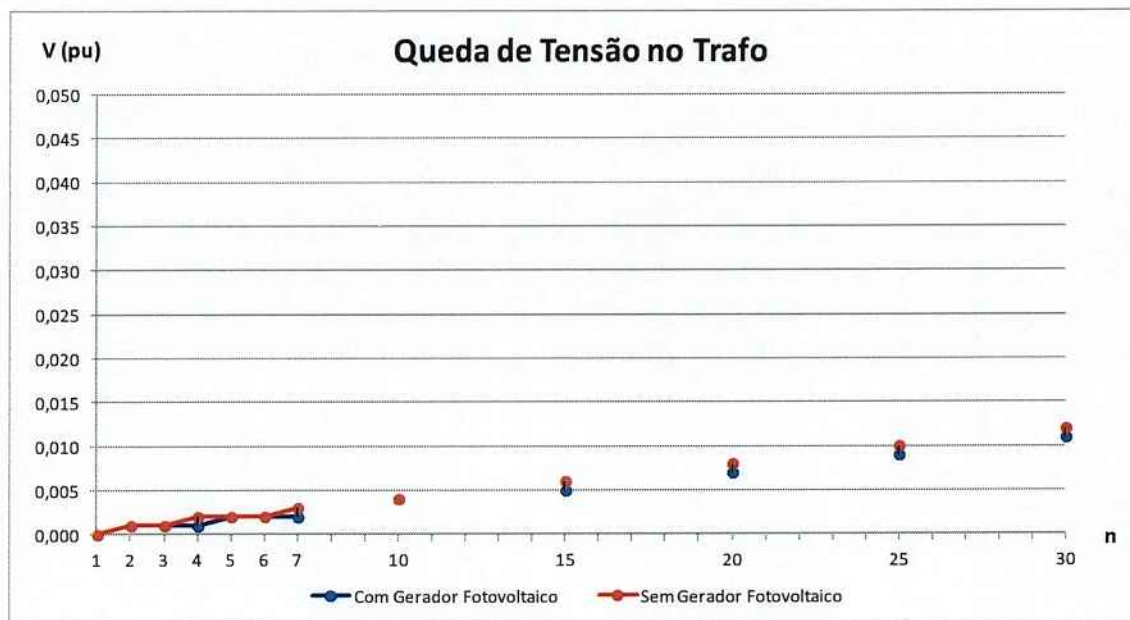


Figura 86 - Queda de Tensão no Trafo às 6h.

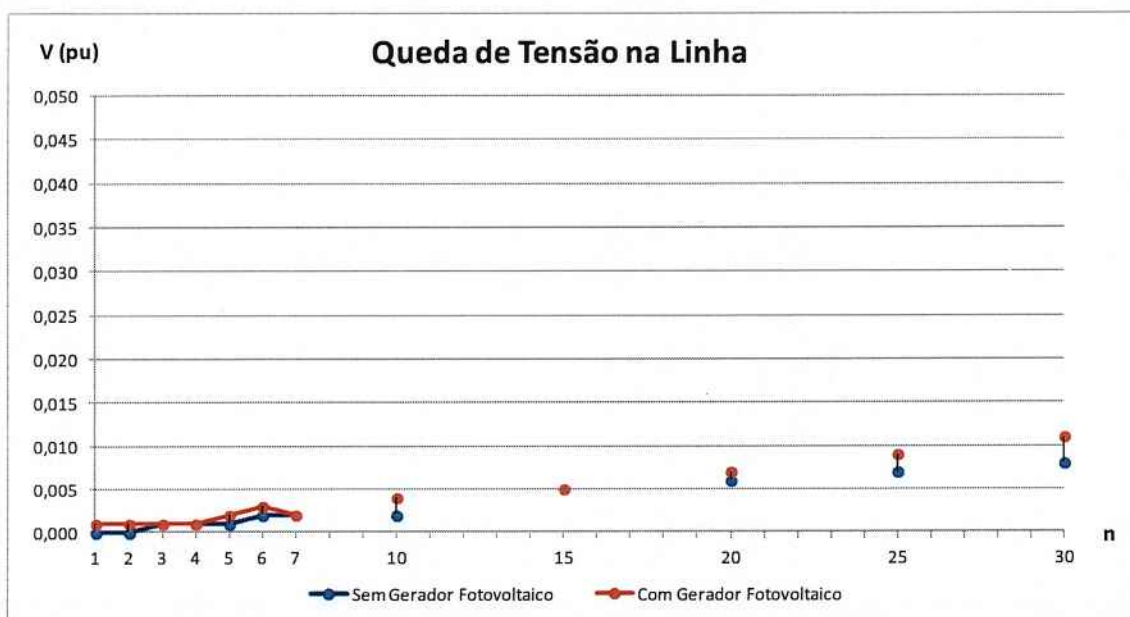


Figura 87 - Queda de Tensão na Linha às 6h.

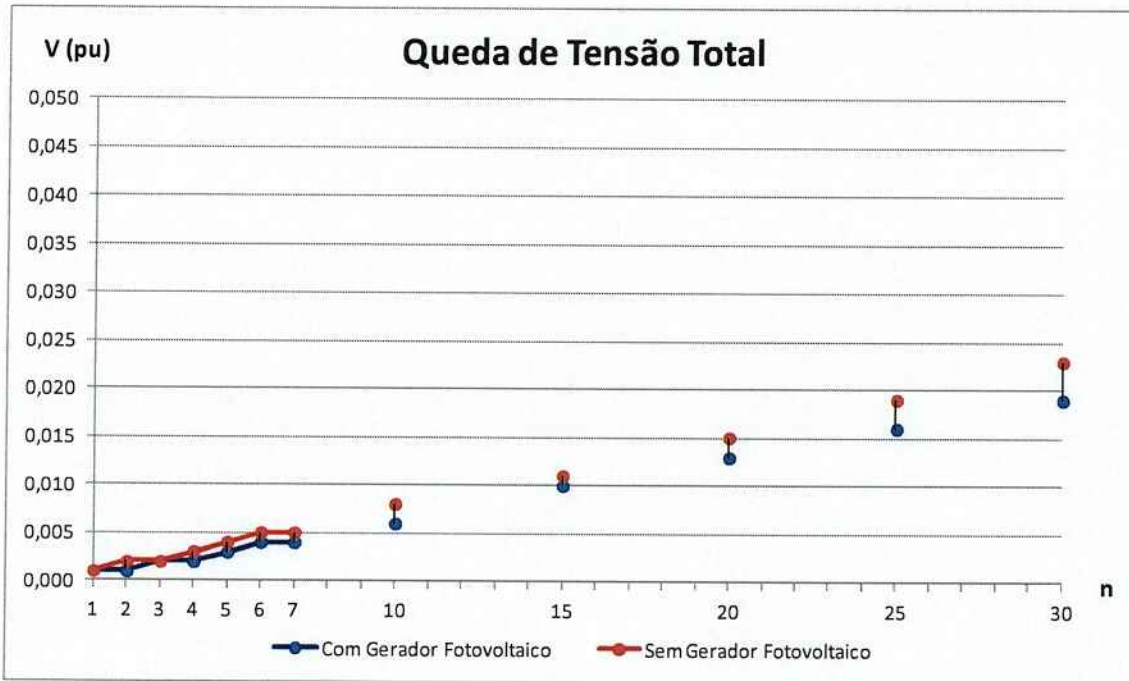


Figura 88 - Queda de Tensão Total às 6h.

Hora do Dia = 7h

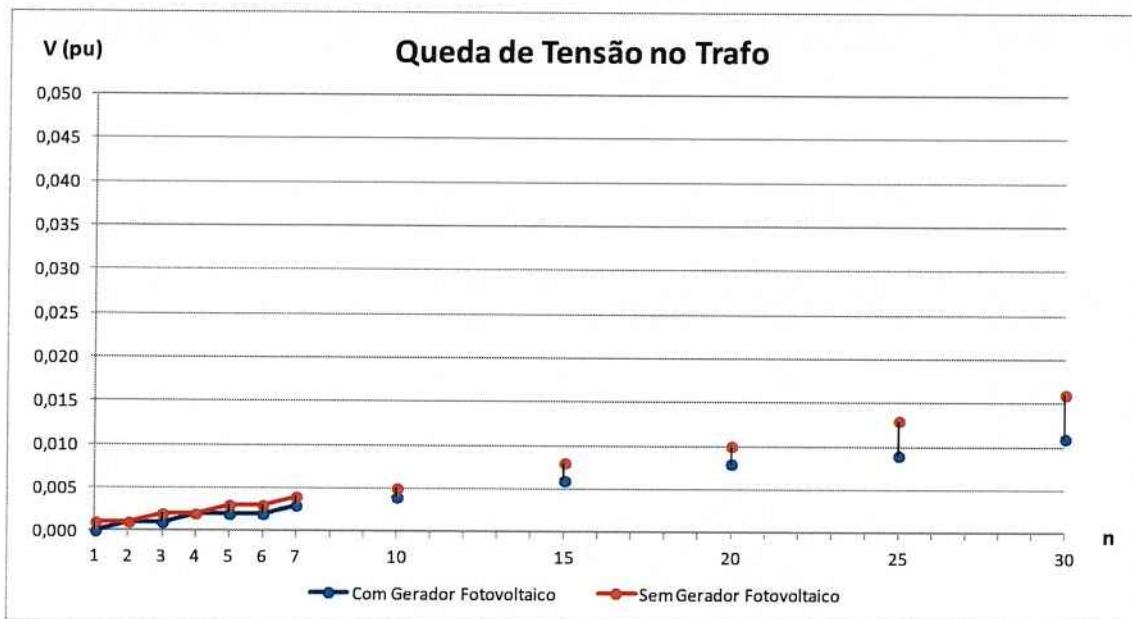


Figura 89 - Queda de Tensão no Trafo às 7h.

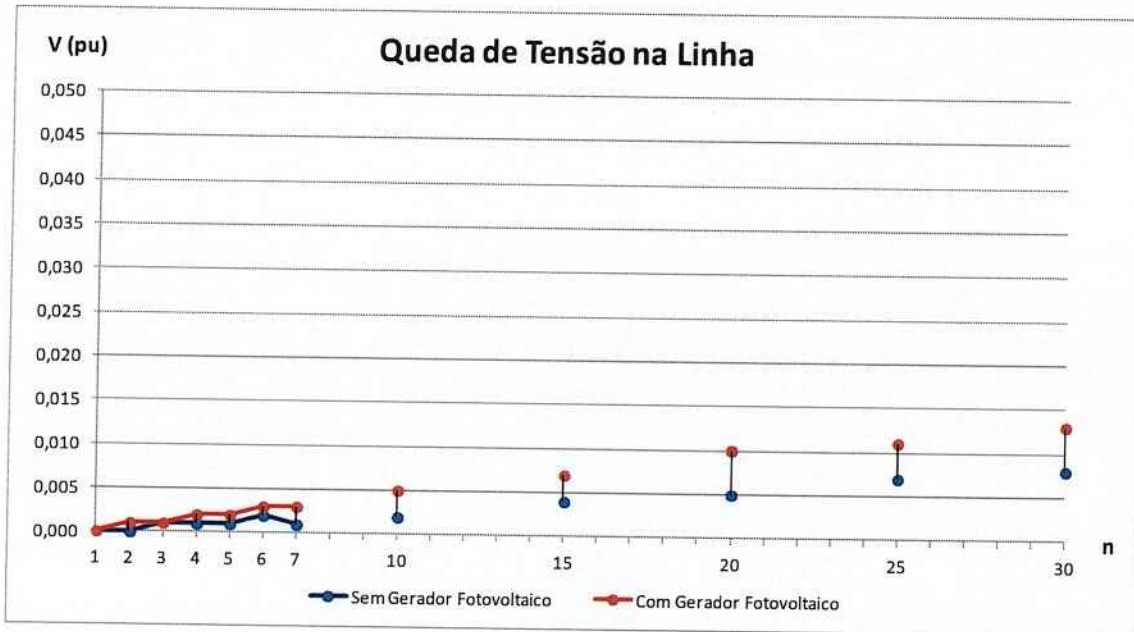


Figura 90 - Queda de Tensão na Linha às 7h.

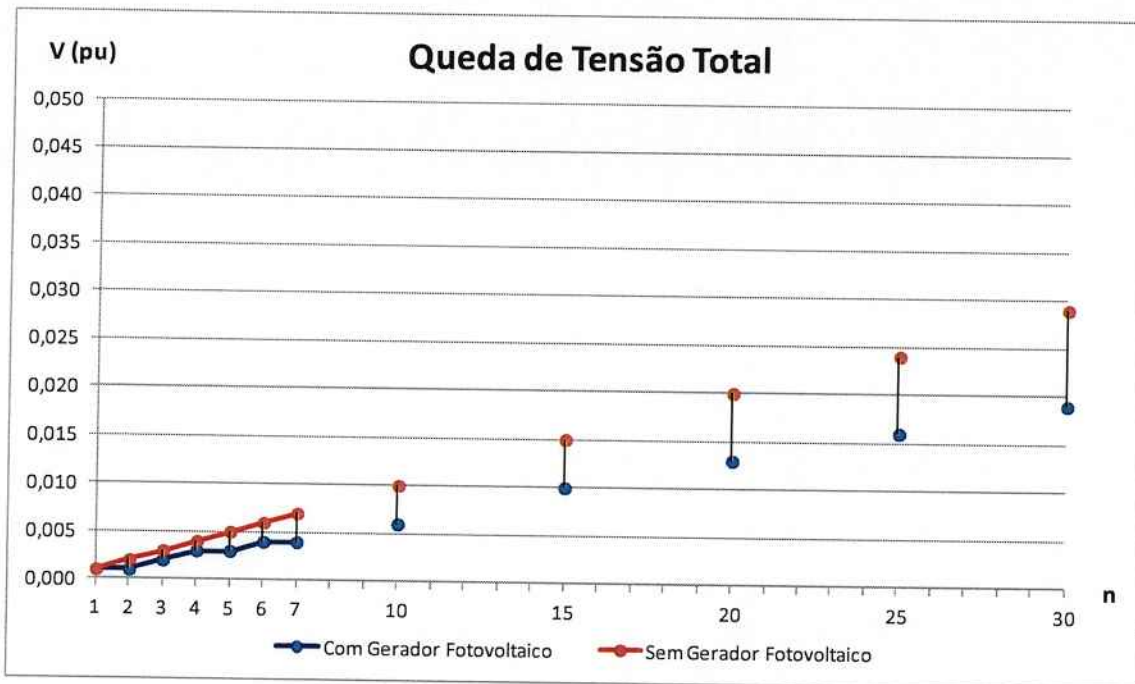


Figura 91 - Queda de Tensão Total às 7h.

Hora do Dia = 8h

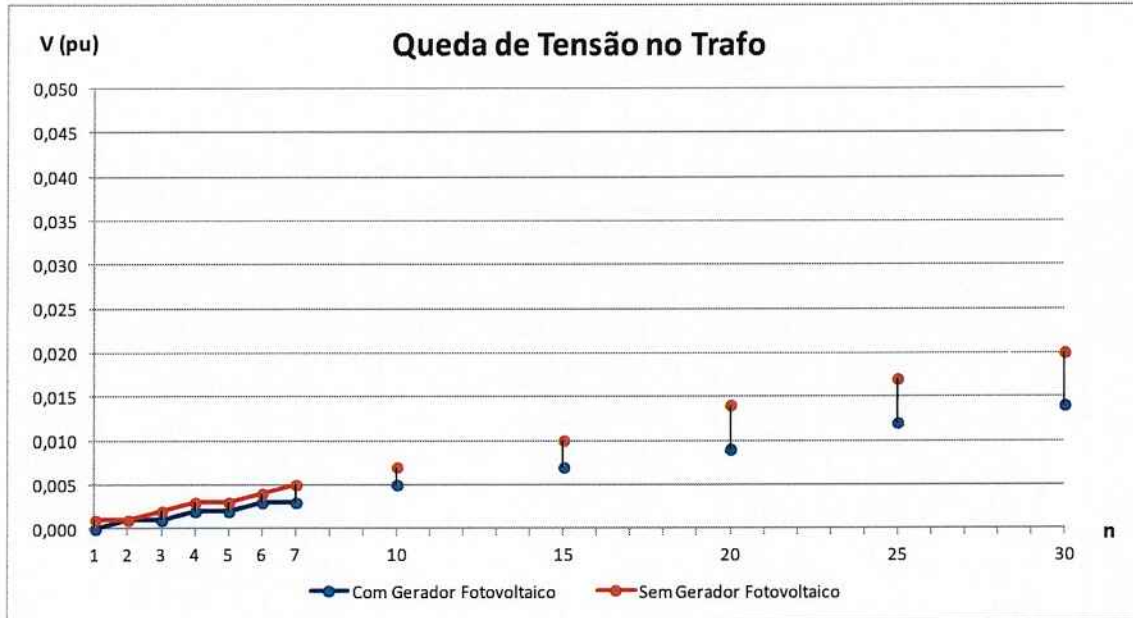


Figura 92 - Queda de Tensão no Trafo às 8h.

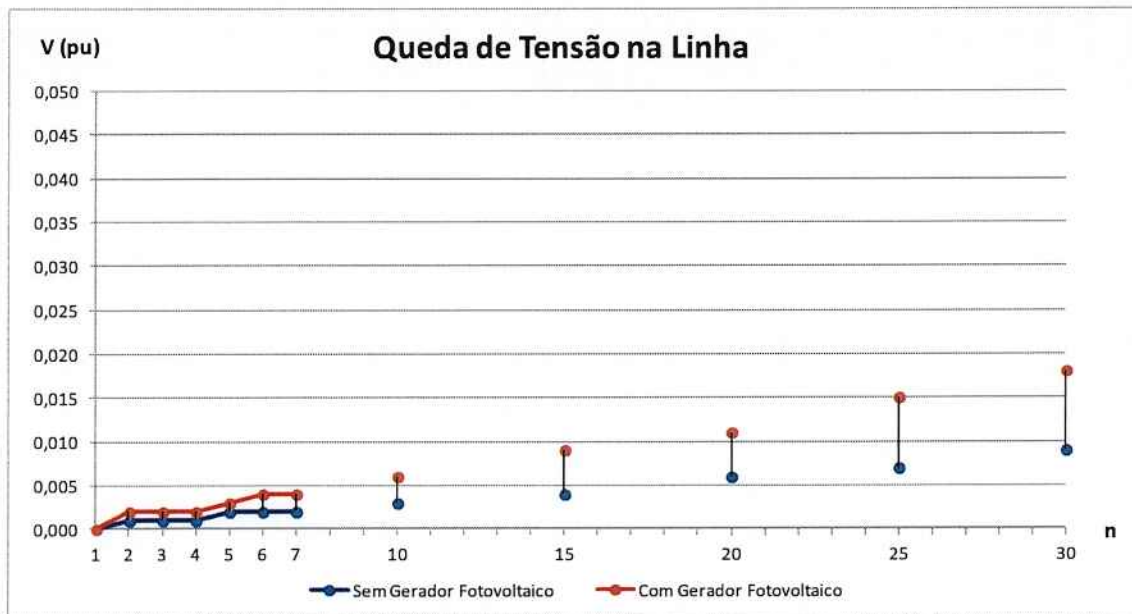


Figura 93 - Queda de Tensão na Linha às 8h.

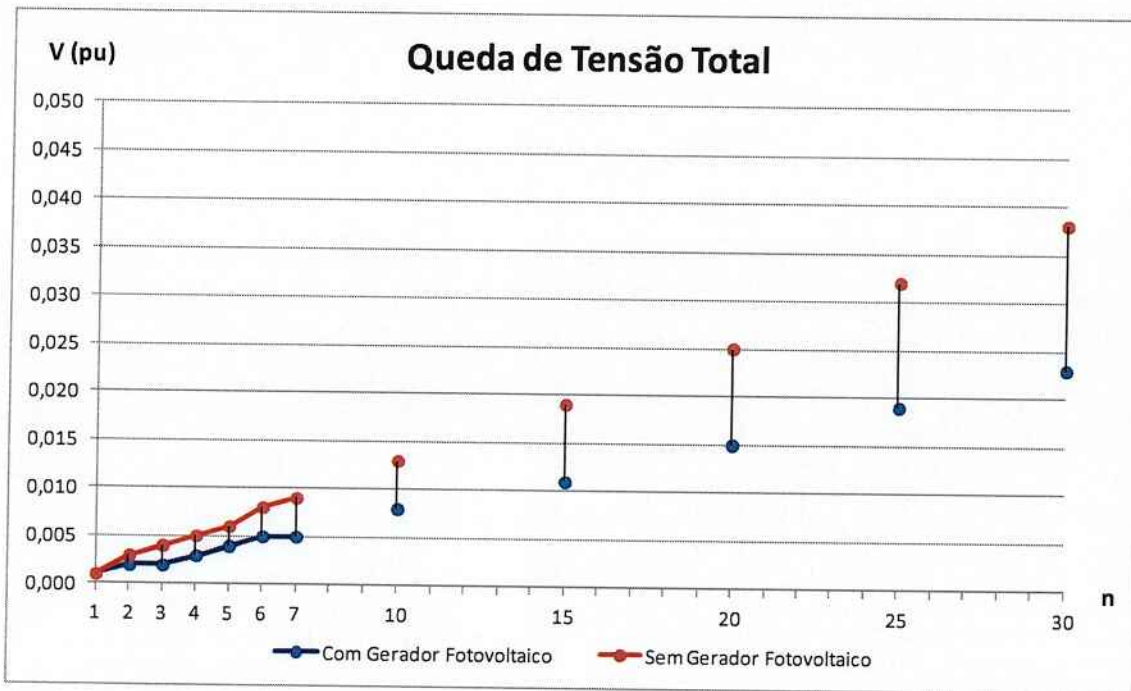


Figura 94 - Queda de Tensão Total às 8h.

Hora do Dia = 9h

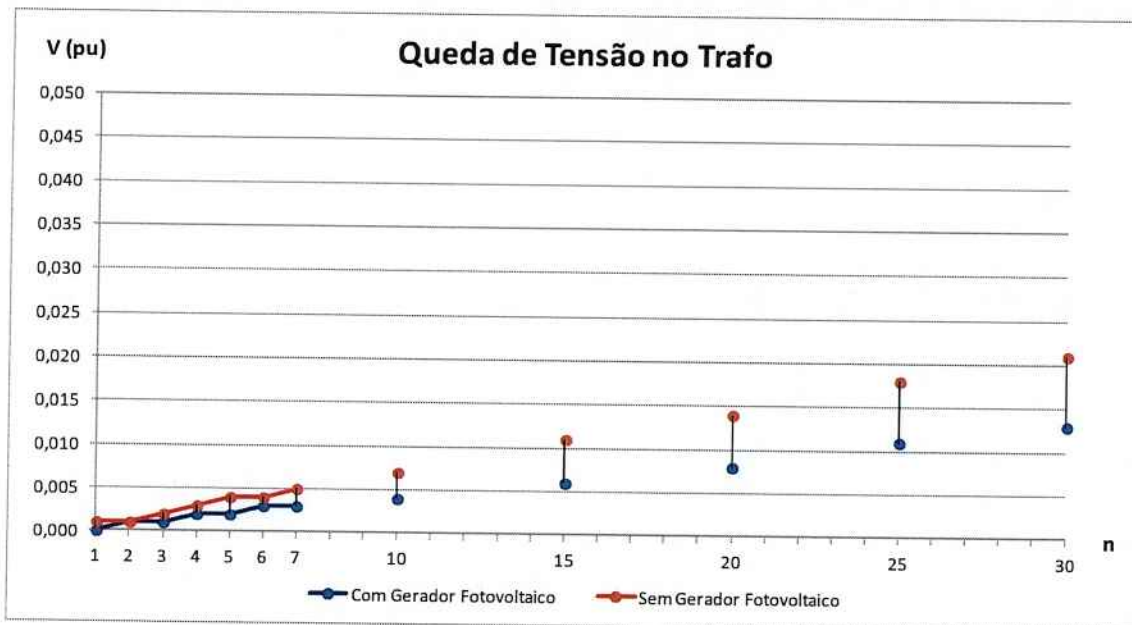


Figura 95 - Queda de Tensão no Trafo às 9h.

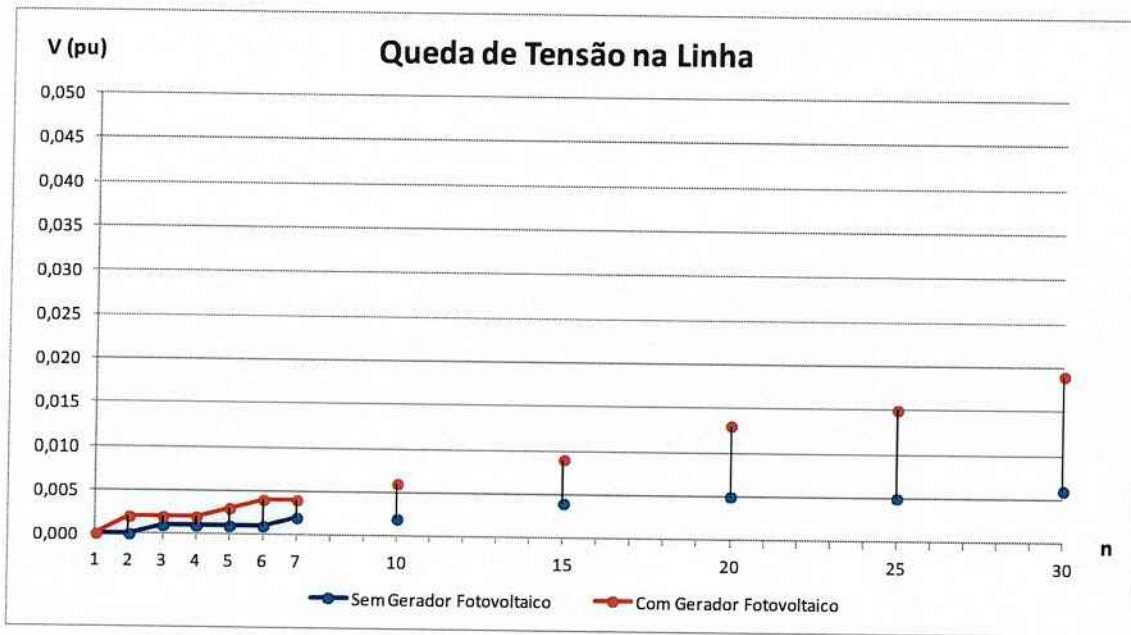


Figura 96 - Queda de Tensão na Linha às 9h.

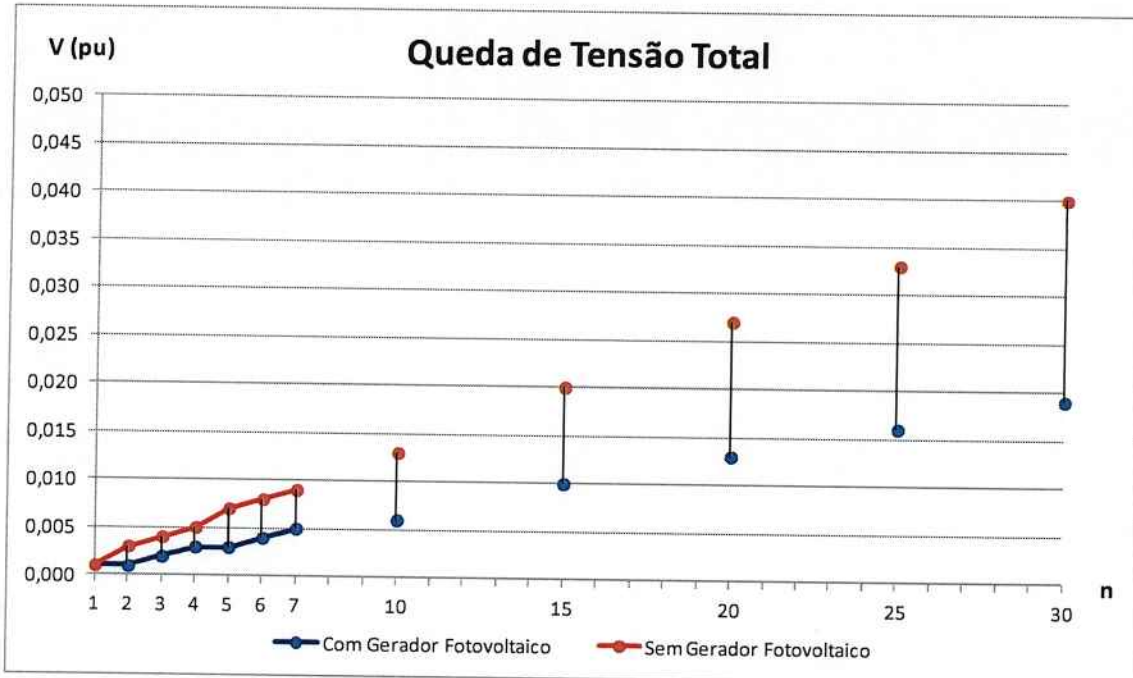


Figura 97 - Queda de Tensão Total às 9h.

Hora do Dia = 10h

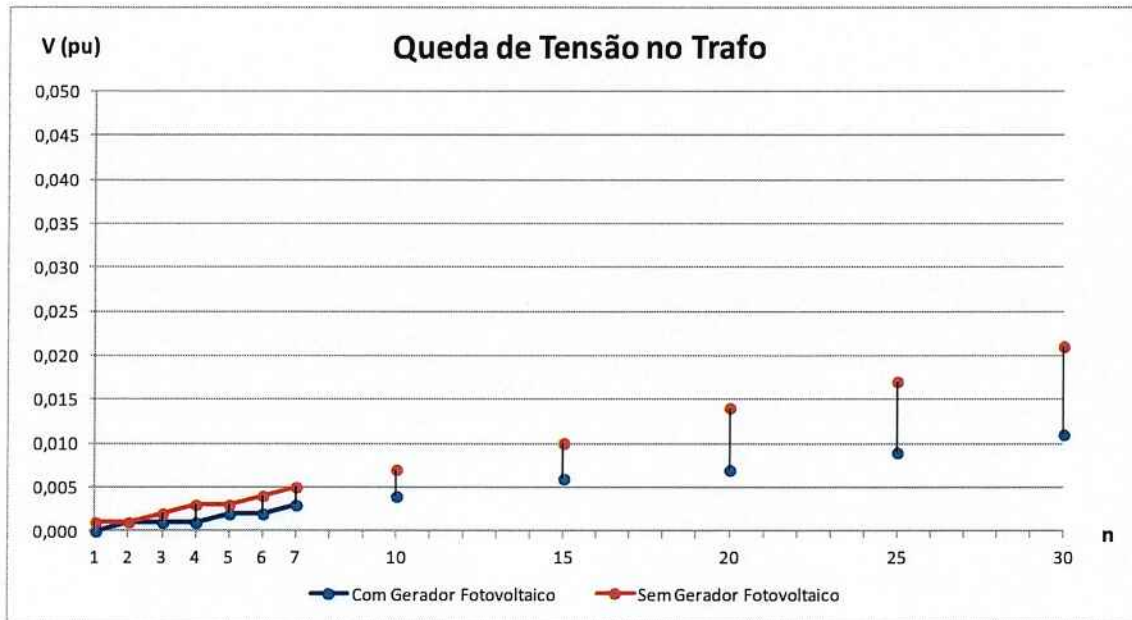


Figura 98 - Queda de Tensão no Trafo às 10h.

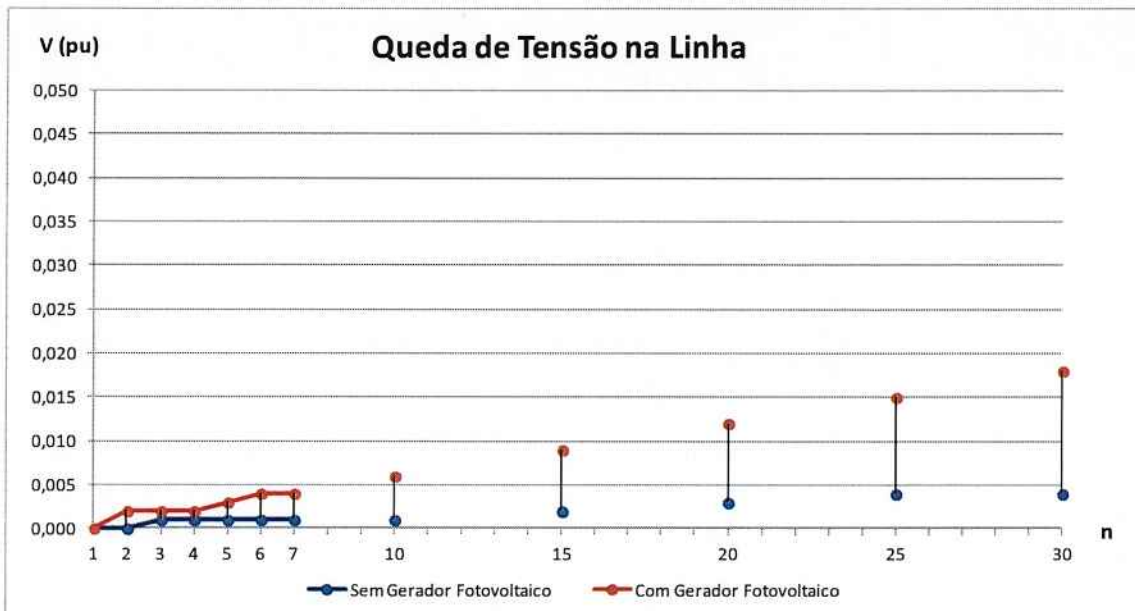


Figura 99 - Queda de Tensão na Linha às 10h.

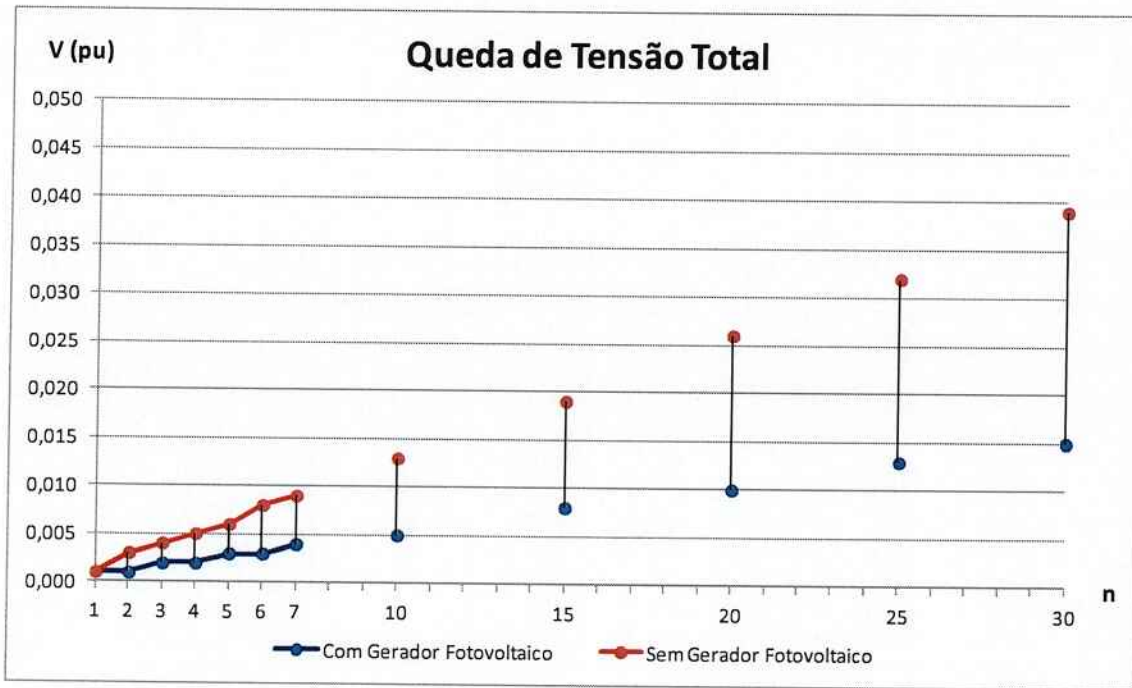


Figura 100 - Queda de Tensão Total às 10h.

Hora do Dia = 11h

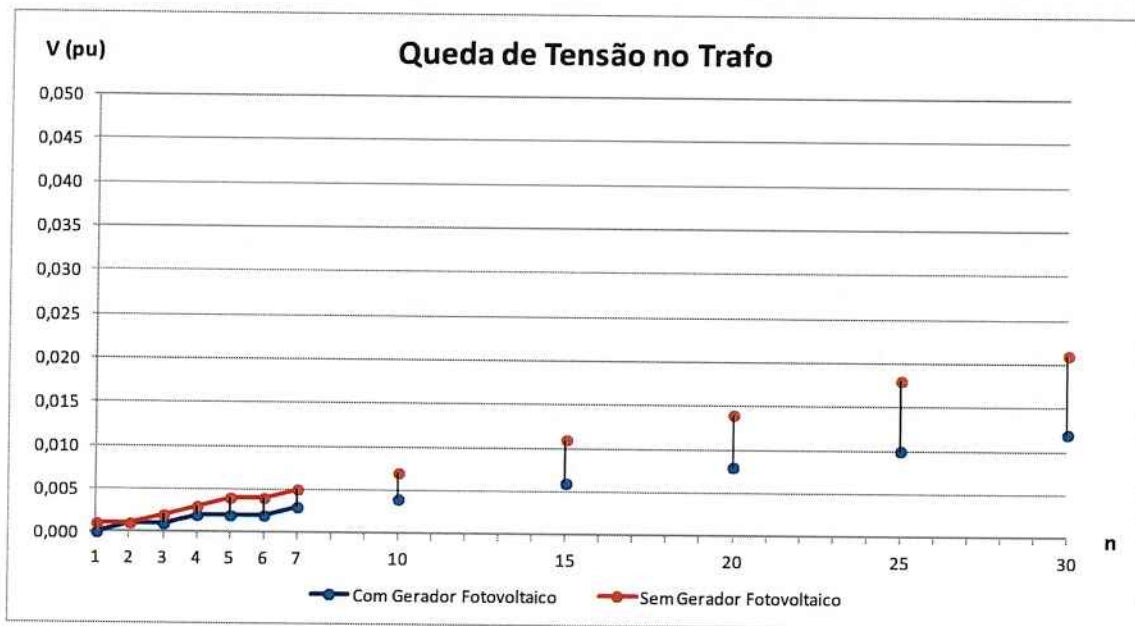


Figura 101 - Queda de Tensão no Trafo às 11h.

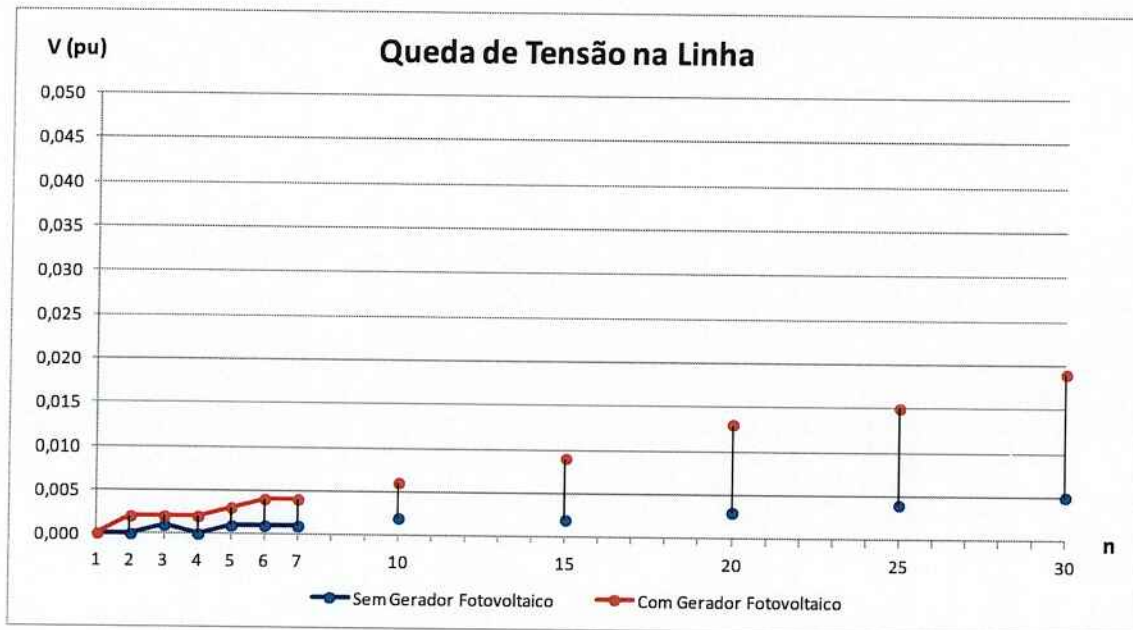


Figura 102 - Queda de Tensão na Linha às 11h.

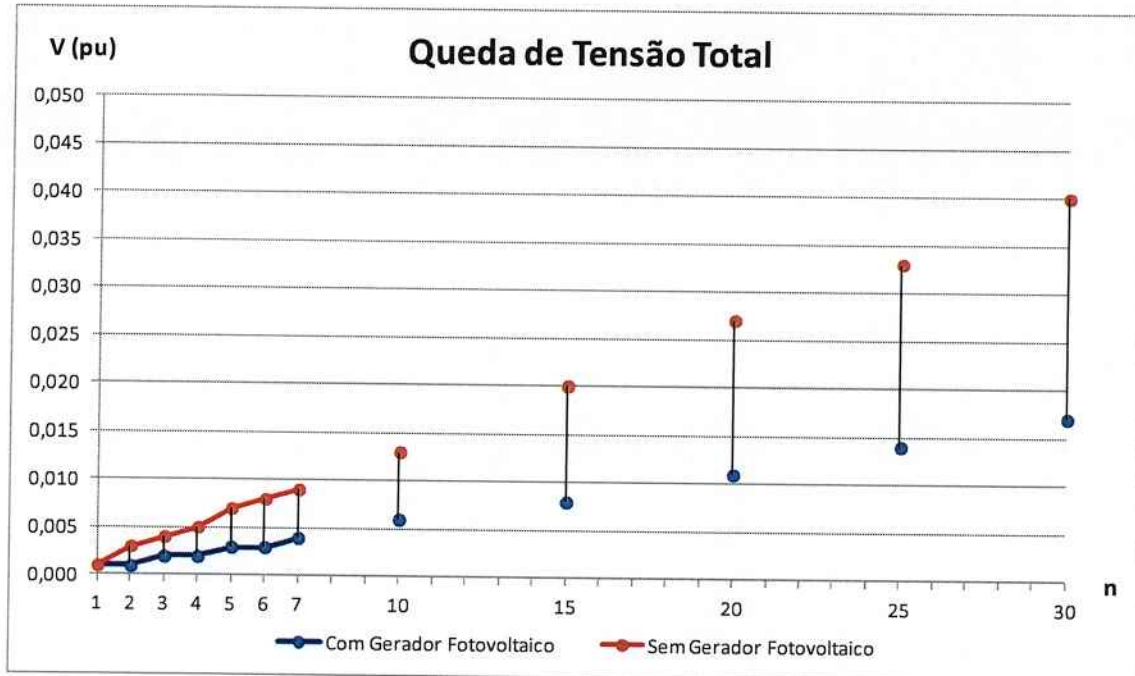


Figura 103 - Queda de Tensão Total às 11h.

Hora do Dia = 13h (12h está diretamente inserido no texto da dissertação)

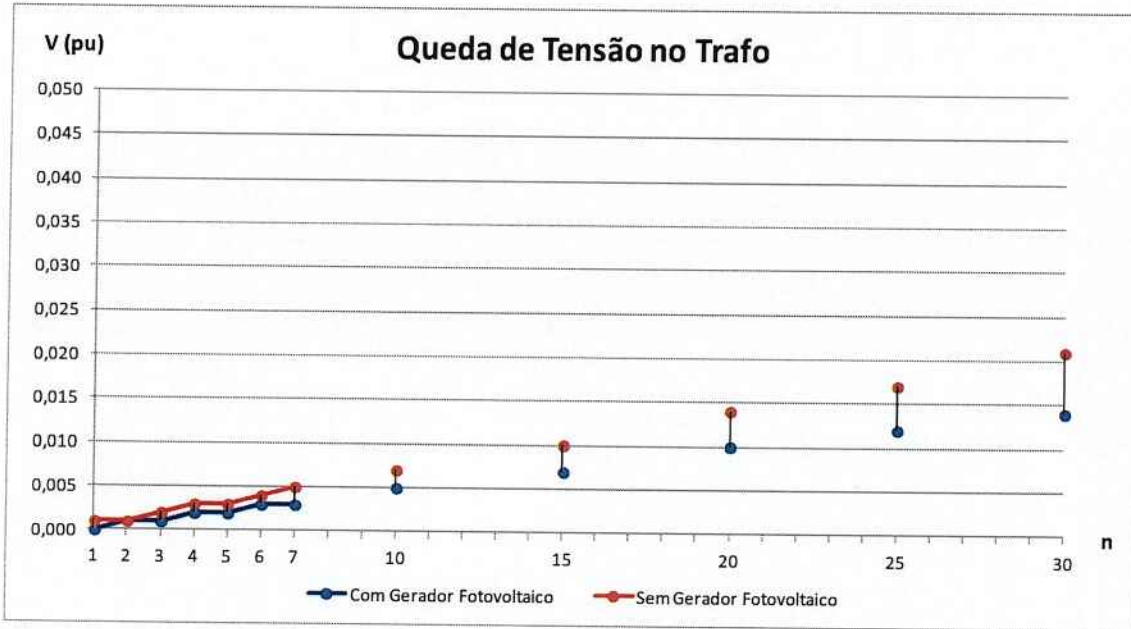


Figura 104 - Queda de Tensão no Trafo às 13h.

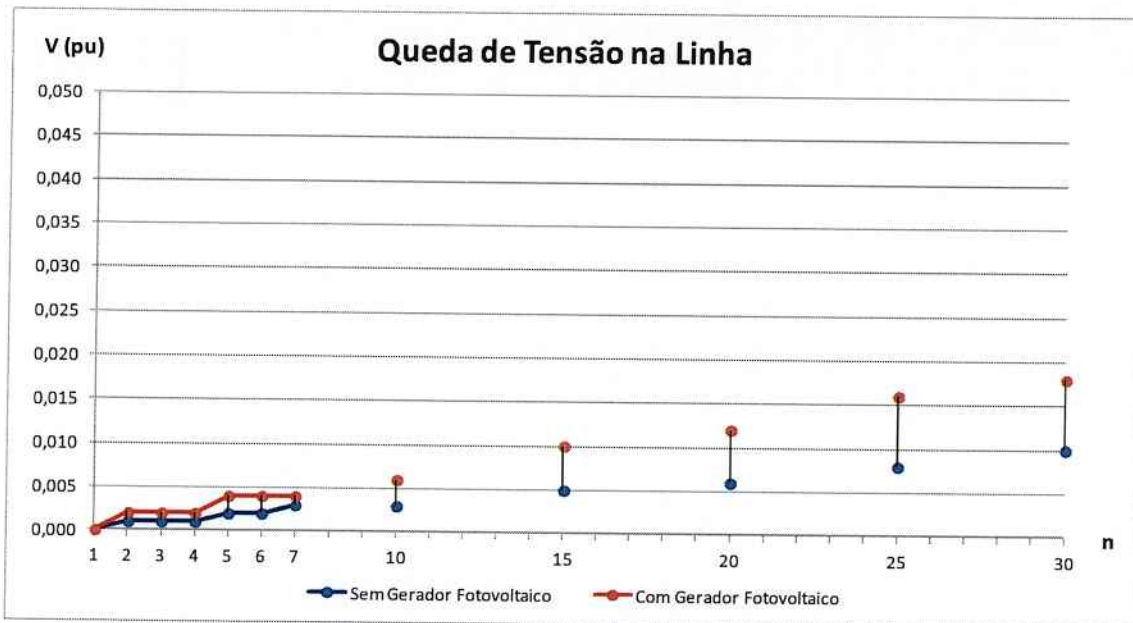


Figura 105 - Queda de Tensão na Linha às 13h.

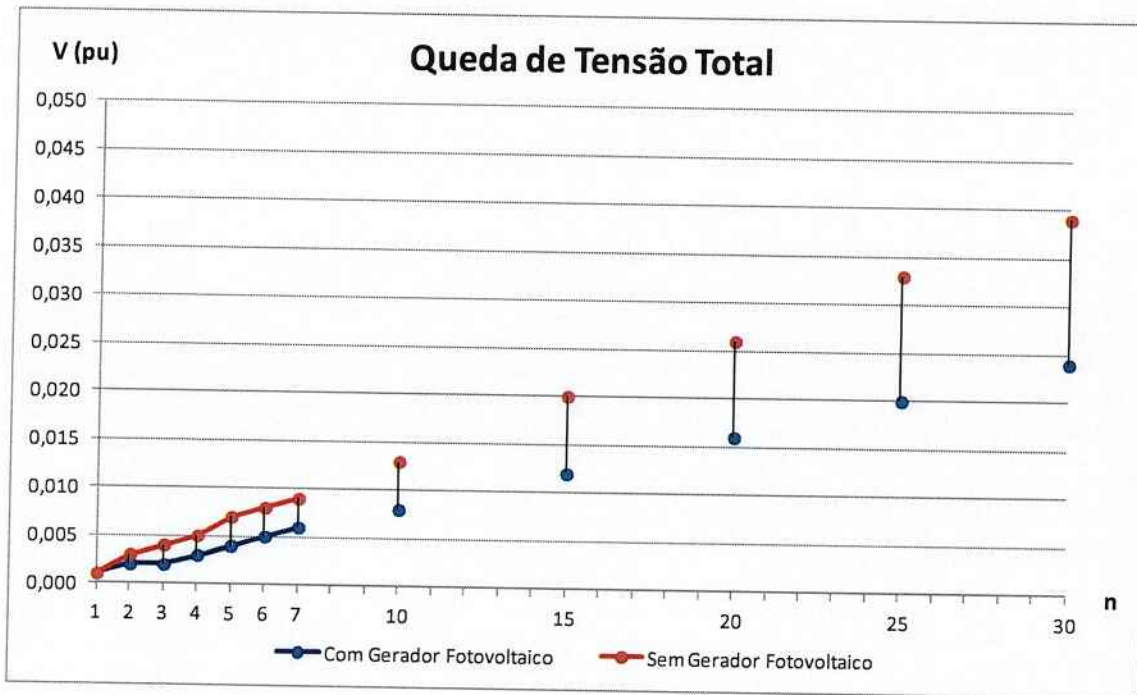


Figura 106 - Queda de Tensão Total às 13h.

Hora do Dia = 14h

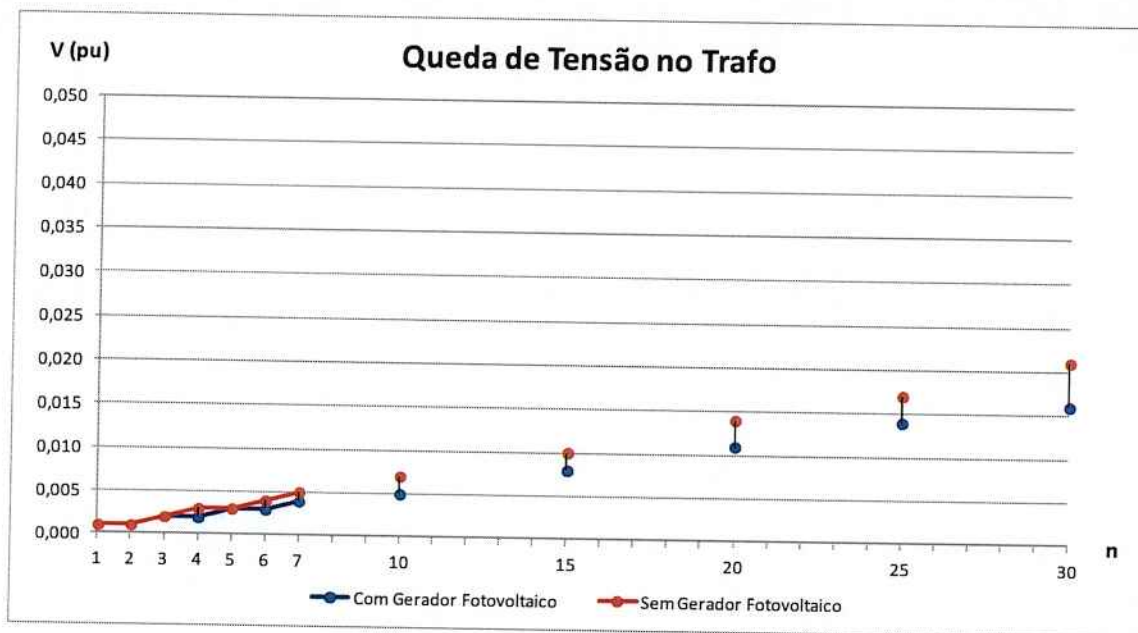


Figura 107 - Queda de Tensão no Trafo às 14h.

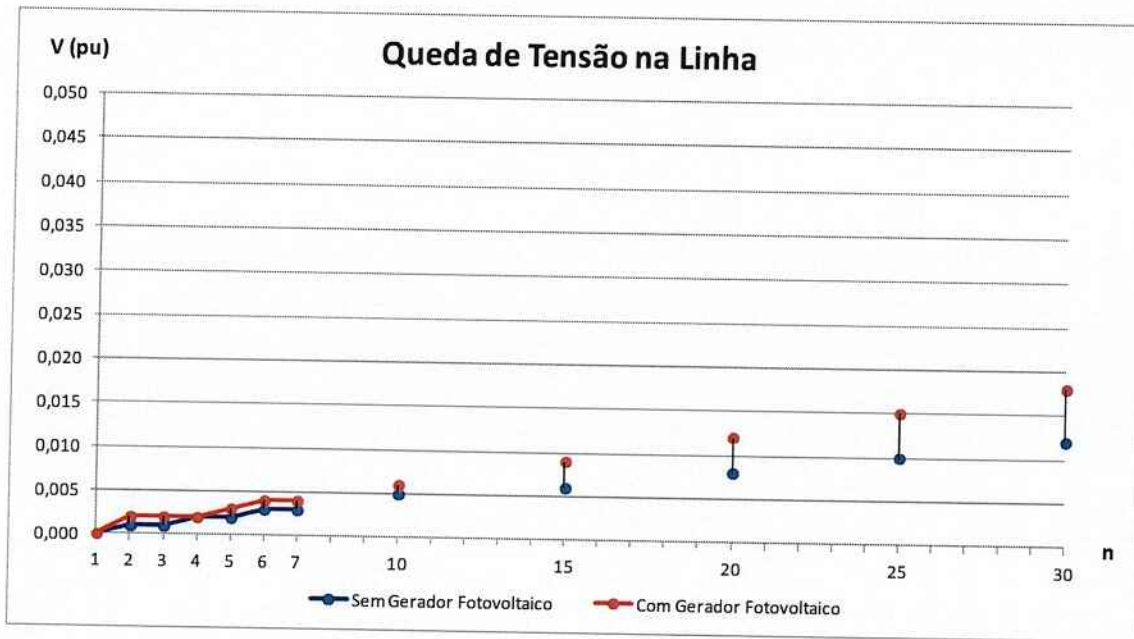


Figura 108 - Queda de Tensão na Linha às 14h.

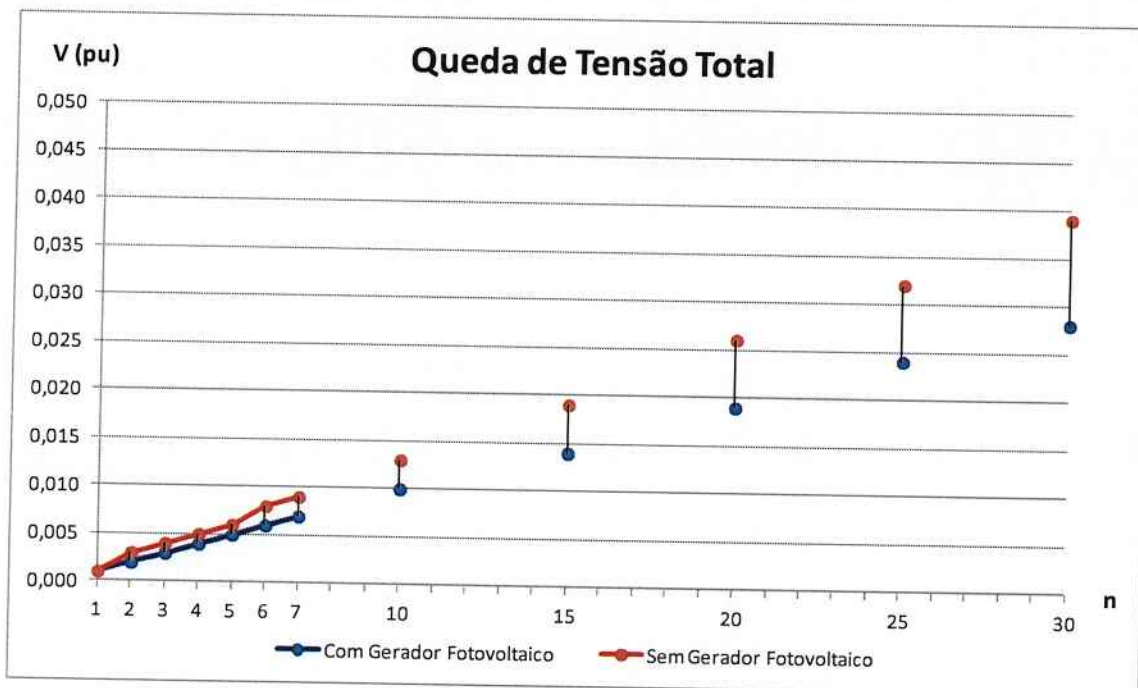


Figura 109 - Queda de Tensão Total às 14h.

Hora do Dia = 15h

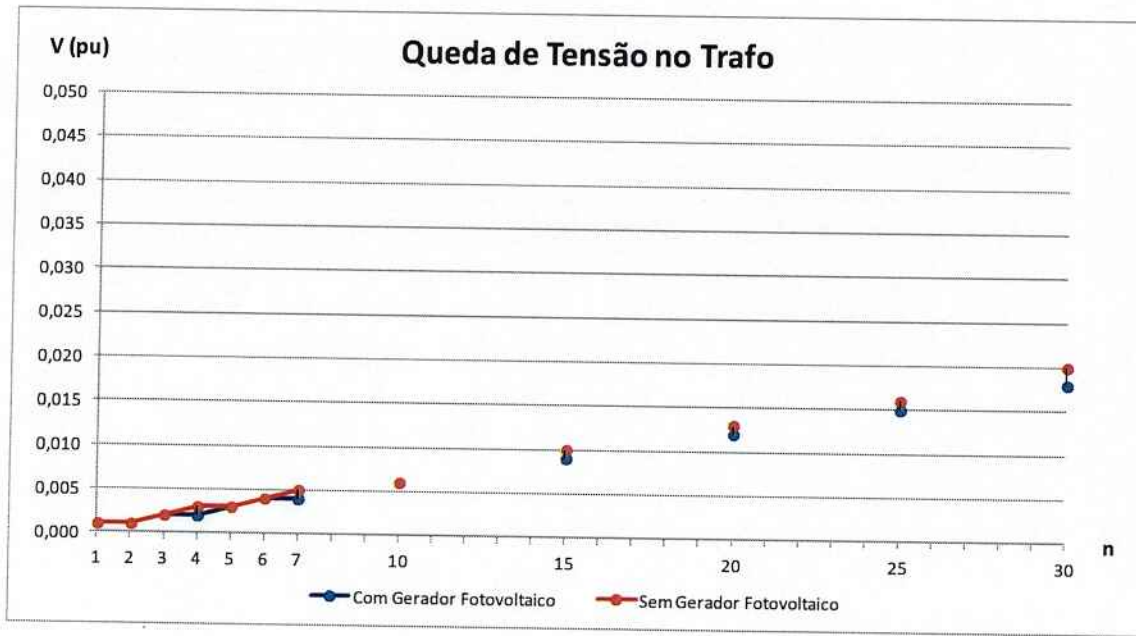


Figura 110 - Queda de Tensão no Trafo às 15h.

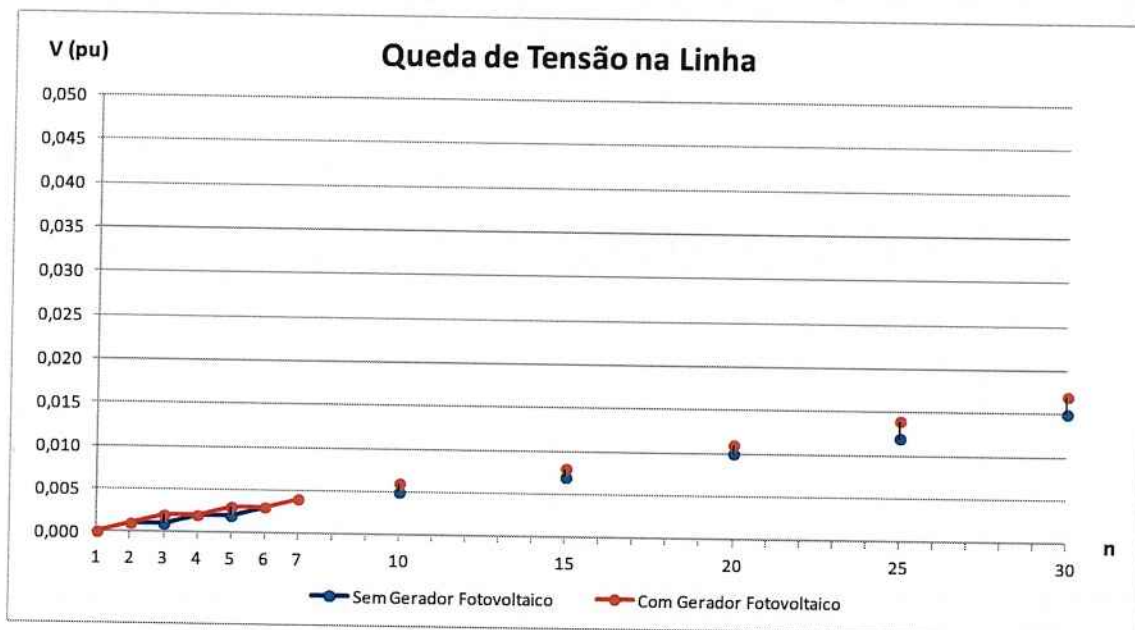


Figura 111 - Queda de Tensão na Linha às 15h.

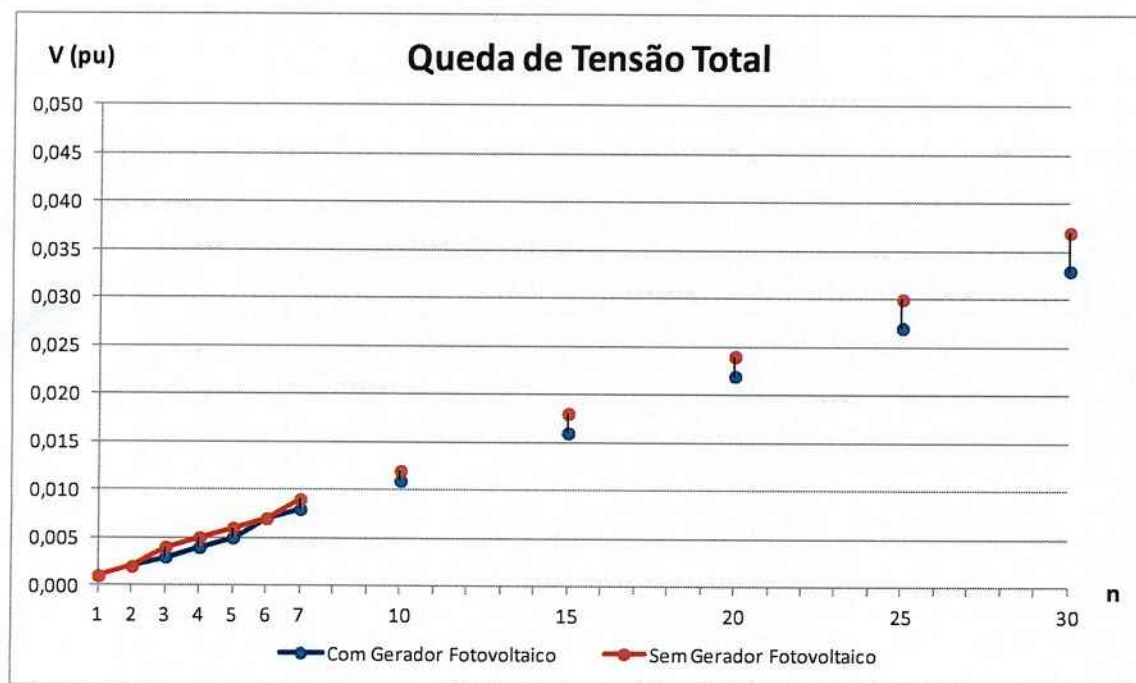


Figura 112 - Queda de Tensão Total às 15h.