

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS ARARANGUÁ

VITOR ANTUNES

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ

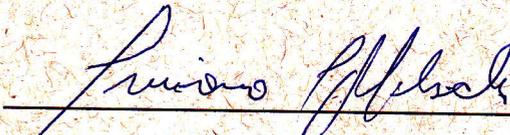
2016

VITOR ANTUNES

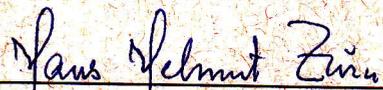
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

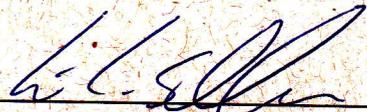
Aprovado em: 02/12/16



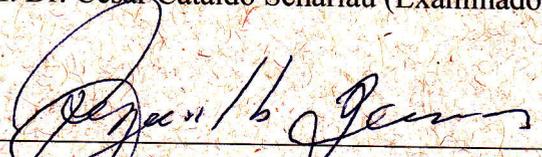
Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher (Orientador)



Prof. Dr. Hans Helmut Zurn (Examinador)



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Examinador)



Prof. Dr. Reginaldo Geremias (Supervisor)

ANÁLISE DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM UMA MICRORREDE DE BAIXA TENSÃO

Vitor Antunes¹

RESUMO

Com o atual cenário energético, onde cada vez mais busca-se a descentralização da geração de energia elétrica, torna-se evidente a necessidade de avaliar o impacto dessas novas alternativas de geração distribuída na rede de distribuição local existente. Com esse intuito, o presente trabalho tem como objetivo analisar os possíveis impactos relacionados à qualidade da energia provocados pela conexão de microgerações fotovoltaica em uma microrrede de baixa tensão que opera em regime permanente. Para tanto, buscou-se avaliar parâmetros como níveis de tensão, queda de tensão, fluxo de potência e distorção harmônica existente. Estas análises foram desenvolvidas através da elaboração de modelos no ambiente MATLAB/SIMULINK, onde diferentes cenários foram analisados, considerando diferentes cargas conectadas à microrrede (pesada, intermediária, leve), além de cenários com geração alta, média e baixa e sem geração. No total foram elaborados 12 cenários para análise. Os modelos propostos apresentaram resultados satisfatórios em termos de qualidade de energia na microrrede pós conexão da geração distribuída, sendo verificadas melhoras substanciais nos níveis de tensão, chegando a reduzir em 10% a queda de tensão sem a inserção de grande níveis de distorção harmônica, sempre próximos a 2%.

Palavras-chave: Microrrede. Geração Distribuída. Qualidade de Energia

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88905-355. E-mail: vitormacan@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

A tradicional estrutura de transmissão e distribuição de energia é formada principalmente por grandes centros de geração, baseados principalmente em formas tradicionais de geração, como hídrica e térmica, e normalmente estão concentrados em regiões distantes dos maiores centros de carga.

Com o advento e o aumento da penetração de sistemas de geração distribuída baseada em fontes renováveis de energia, como a geração fotovoltaica, esta estrutura mais tradicional deve ser alterada.

A integração destas fontes de geração distribuídas pode ocorrer por meio de microrredes. Essa topologia pode ser caracterizada como uma representação em menor escala da rede de transmissão, podendo operar de forma independente, desconectada, ou em paralelo, operando em conjunto.

A operação de microrredes contendo geração local de energia traz diversos benefícios ao sistema elétrico, podendo destacar a redução de perdas relacionadas a distribuição da energia, justamente pelo fato de haver geração próximo aos pontos de consumo.

Assim, análises do comportamento de microrredes e do impacto na qualidade da energia que é ocasionado pela inclusão de geração distribuída estão cada vez mais sendo estudados. Em Wanwan (2014), Leon (2013) e Galhardo (2011) são apresentados estudos relacionados ao impacto da inclusão de geração distribuída em microrredes.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise de uma microrrede, verificando a influência sobre a qualidade da energia de diferentes cenários, analisando a variação da geração existente e da carga conectada. Foram analisados 12 cenários, com 3 níveis de geração (Alta, média e baixa), além de sem geração para três níveis distintos de cargas (pesada, intermediária e leve).

A fim de realizar essa análise buscou-se verificar o comportamento ao longo da microrrede de parâmetros como: níveis de tensão, queda de tensão, fluxo de potência e distorção harmônica.

Para isso, utilizou-se o *software MATLAB/SIMULINK* para realizar todas as simulações necessárias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados os pressupostos teóricos básicos relacionados à temática estudada na presente pesquisa.

2.1 Microrredes

Uma microrrede é definida como um sistema interligado de cargas contendo recursos capazes de gerar energia de forma distribuída, além da possibilidade de conter sistemas de armazenamento de energia, como banco de baterias. Pode-se haver geração renovável, como fotovoltaica e eólica e também geração convencional, a partir de geradores a diesel por exemplo (HARTONO; BUDIYANTO; STETIABUDY, 2013).

Uma representação simplificada de microrrede é apresentada na Figura 1.

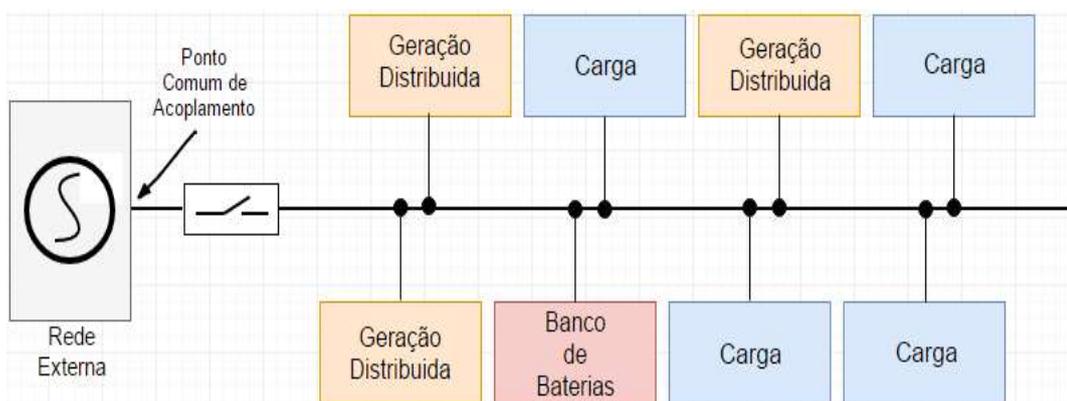


Figura 1 – Representação esquemática de uma microrrede (Fonte: Patrão et al., 2015 - Adaptado)

A característica de conter fontes de geração, torna possível que a microrrede opere em conjunto com a rede elétrica convencional, estando conectada a ela em paralelo, ou opere de forma isolada, com a capacidade de se tornar autossustentável (ALMADA, 2013).

Microrredes possuem a vantagem de, em perturbações nas redes de transmissão, se desconectar do sistema e operar autonomamente por meio da geração local, suprindo suas cargas correspondentes, como apresentado na Figura 2 (TAHIM, 2015).

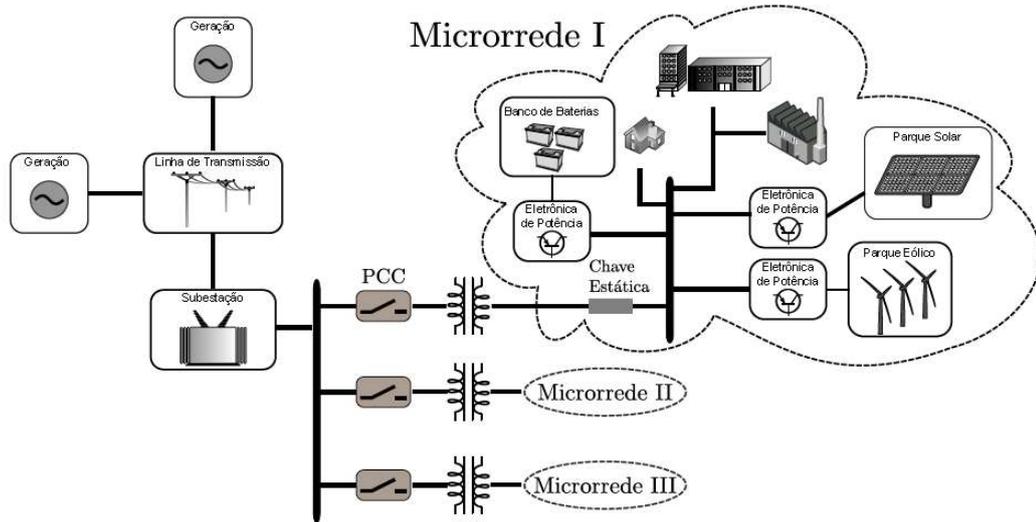


Figura 2 – Estrutura de um sistema baseado em microrredes (Fonte: Tahim, 2015)

Segundo Mahmoud, Sunni e Rahman (2015), pode-se considerar que uma microrrede é uma versão em menor escala da rede tradicional, contendo seu próprio sistema de geração e suas cargas, sendo que esta tem a possibilidade de operar de forma conectada à rede de transmissão ou de forma ilhada.

Microrredes podem ser caracterizadas conforme diferentes critérios. A Tabela 1 apresenta algumas de suas classificações.

Critério	Configuração
Barramento	CC CA CC e CA
Interação com a rede	Remota Complementar Conectada
Tipos de Gerações Distribuídas	Renováveis Tradicionais Híbridas
Tipos de carga	CC CA CC e CA

Tabela 1 – Configurações típicas de microrredes (Fonte: Rey-Lopez, 2014 – Adaptado)

A principal diferenciação entre microrredes está no tipo de barramento ao qual cargas, gerações e sistemas de armazenamento estão conectados. A escolha por barramentos CC ou CA influi diretamente no sistema de controle que deve haver. Para CC, basicamente se controla o nível de tensão, já em CA deve-se observar também a frequência (SABZEHGAR, 2015).

Além disso, a diferença de topologias traz a necessidade de diferentes equipamentos eletrônicos, como conversores e inversores de frequência.

Segundo Tahim (2015), a tipologia de microrrede com apenas barramentos CC não é desejável, pois embora existam muitas cargas CC, a grande maioria é alimentada pelo padrão CA, deste modo, seria necessário de conversores para atender essas cargas.

2.1.1 Topologias de microrredes CC

Uma microrrede pode ser considerada com barramento CC quando apenas exista um conversor bidirecional CC-CA realizando a conexão entre a rede tradicional e a microrrede (ALMADA, 2013). Essa configuração é apresentada na Figura 3.

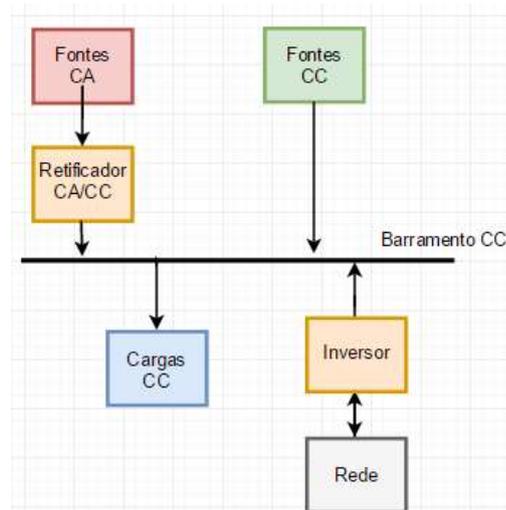


Figura 3 – Estrutura básica de uma microrrede com barramento CC (Fonte: Rey-Lopez, 2014)

A partir dessa estrutura apresentada, diversas microrredes são apresentadas na literatura. Khanh, et al. (2010) propôs uma microrrede com barramento CC composta por um sistema fotovoltaico e uma célula combustível, como é visto na Figura 4.

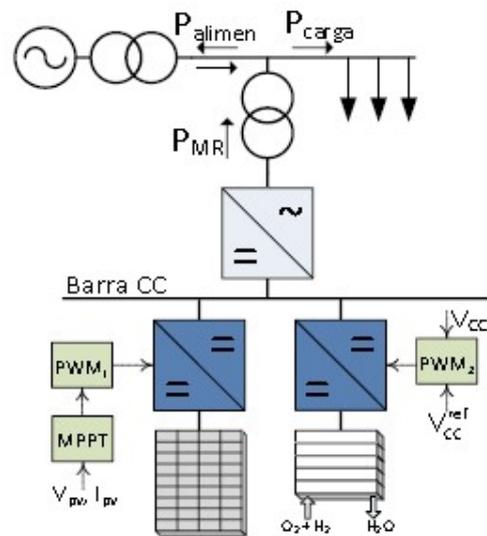


Figura 4 – Configuração de microrrede desenvolvida por Khanh, et al. (2010)

Outra configuração de microrrede CC encontrada na literatura é desenvolvida por Zhang, et al. (2011). Nesse trabalho foi desenvolvida através de um conjunto de painéis fotovoltaicos, além de um banco de baterias. As cargas existentes também são conectadas no barramento CC, como é visto na Figura 5.

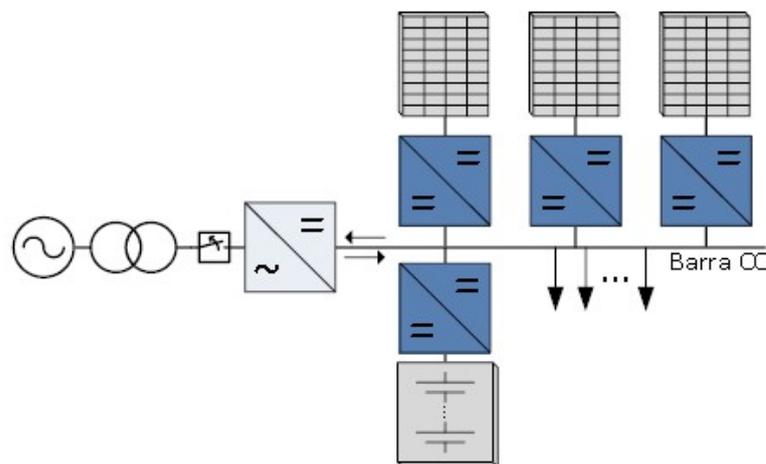


Figura 5 – Configuração de microrrede desenvolvida por Zhang, et al. (2011)

A principal diferença entre as microrredes apresentadas está no fato de a primeira ser conceituada especificamente para a operação de forma conectada à rede, já a segunda possui a característica de operação, além conectada, também de forma autônoma (ZHANG et al., 2011).

2.1.2 Topologias de microrredes CA

Topologias contendo barramentos CA também são bastante aprofundados na literatura, havendo diversas configurações de microrredes que atendem a esta característica (REY-LOPEZ, 2014). Uma representação para essa tipologia é apresentada na Figura 6.

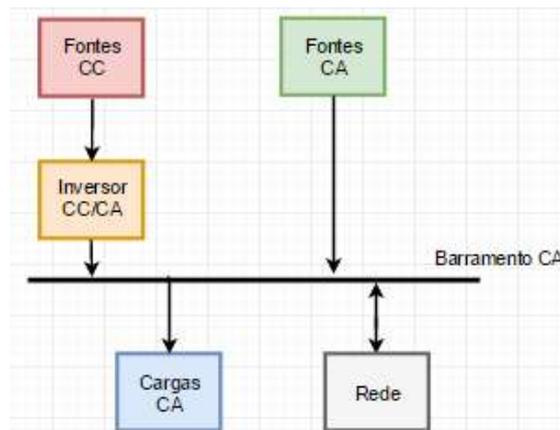


Figura 6 - Estrutura básica de uma microrrede com barramento CA (Fonte: Rey-Lopez, 2014 - Adptado)

Em Jeon, et al. (2010) é apresentada uma microrrede composta por três diferentes tipos de geração, sendo incluída a geração fotovoltaica, eólica e um gerador a Diesel. Esse sistema é apresentado na Figura 7.

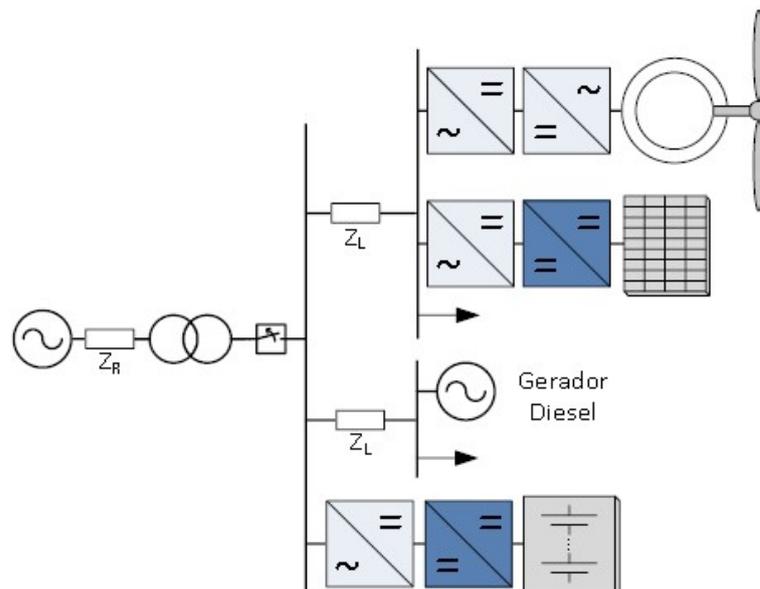


Figura 7 – Configuração de microrrede desenvolvida por Jeon, et al. (2010)

2.2 Geração Distribuída

Geração distribuída pode ser definida como uma fonte de potência elétrica conectada diretamente à rede de distribuição, o que caracteriza uma proximidade com o consumidor (TAHIM, 2015). Segundo INEE (2008), essa geração independe da potência, tecnologia e fonte de energia.

Atualmente existem grandes perspectivas de crescimento desse tipo de geração. Assim uma análise dessa inclusão no sistema deve ser realizada.

Com a geração distribuída existe uma série de vantagens, podendo-se destacar: redução de perdas de transmissão devido ao fato de a geração encontrar-se próximo ao consumo, capacidade de diversificação da matriz energética, principalmente pelo fato de facilitar a inserção de fontes renováveis de geração de pequeno porte e redução da vulnerabilidade do sistema durante distúrbios, pois permite a criação de subsistemas capazes de operar sem conexão com a rede principal (TAHIM, 2015; WRIGHT et al., 2009; LOPES; FERNANDES; SAADE, 2015).

Dentre as alternativas existentes para utilizar-se na forma distribuída, o uso de fontes renováveis ganha destaque. A geração fotovoltaica aparece como principal alternativa para esta utilização, sendo que a cada ano está se tornando mais competitiva economicamente com as formas de geração mais tradicionais.

2.3 Geração Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos são considerados os mais difundidos para o uso de forma descentralizada. Seu princípio de funcionamento é o chamado efeito fotovoltaico. A geração da energia elétrica ocorre através da conversão direta da energia provinda da radiação solar por meio de matérias denominados semicondutores. Esses materiais fundam uma célula fotovoltaica (TAVARES; GAUDINO, 2014).

Os módulos fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de células fabricadas com material semicondutor. Um conjunto de células formam um módulo. Nos módulos

as células podem ser arranjadas de duas maneiras, em série e em paralelo. No caso do arranjo em série, a tensão de cada célula é somada, já no caso do arranjo em paralelo, a corrente da série de células é somada (TAVARES; GAUDINO, 2014).

A partir das células fotovoltaicas, é possível desenvolver modelos matemáticos que representam esta forma de geração. Nos modelos, as células são representadas por um circuito equivalente contendo um ou mais diodos.

2.3.1 Modelo do módulo fotovoltaico

Na literatura, existem diversos modelos que representam um módulo fotovoltaico, havendo diferentes níveis de aprofundamento e de representatividade do fenômeno. Em Brito et al. (2012) é apresentado um modelo matemático simples, onde não considera-se os efeitos da temperatura. Um segundo modelo é apresentado em Villalva; Gazoli; Ruppert (2009), onde considera-se os efeitos da temperatura, apresentando uma boa precisão com relativa simplicidade.

Os modelos desenvolvidos são baseados em representações equivalentes das células fotovoltaicas. Um dos modelos mais usuais está apresentado na Figura 8. Esta representação é caracterizada por conter apenas um diodo. Esse circuito equivalente serve como base para a elaboração dos modelos matemáticos que representam a geração de energia a partir da incidência de radiação em um módulo fotovoltaico.

Referências como Brito et al. (2012) e Villalva; Gazoli; Ruppert (2009) apresentam um maior detalhamento no desenvolvimento dos modelos, apresentando diferentes tipos de modelos desenvolvidos. Em Pinho (2014) é apresentado um manual de sistemas fotovoltaicos voltado para a engenharia. Nesse trabalho existe um grande detalhamento em todos os componentes do sistema e seus equacionamentos para obtenção de modelos.

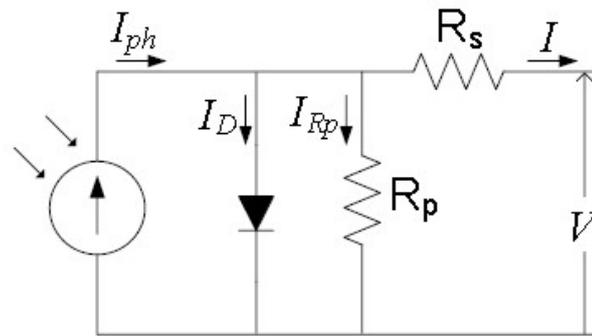


Figura 8 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (Fonte: Brito et al., 2012)

Com a elaboração dos modelos, é possível quantificar a geração existente, porém, como esta geração ocorre no padrão CC e sabendo que grande parte das cargas existentes utilizam a energia no padrão CA, torna-se necessário a inclusão de um sistema de conversão de energia, adequando-a ao padrão requerido pelas cargas.

2.4 Sistema de Conversão

Sabe-se que a geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos é variável, e que fatores como irradiância solar e temperatura afetam o desempenho. A variação desses fatores influenciam na tensão e corrente de saída, e consequentemente na potência gerada.

A fim de manter níveis de tensão e um padrões adequados ao uso, geralmente CA, deve-se utilizar um sistema de conversão capaz de fazer essa adequação.

Na literatura existem algumas configurações com equipamentos eletrônicos que realizam esse processo. Os equipamentos utilizados para esse fim são conhecidos como conversores e inversores. Em Bezerra (2010) e Rashid (2014) são apresentadas as classificações desses equipamentos.

Em sistemas fotovoltaicos, o sistema de conversão de energia possui uma classificação referente ao número de estágios existentes no processo, podendo haver um ou dois estágios (LEON, 2014).

Em processos de conversão de estágio único, utiliza-se apenas um inversor de frequência para conectar a geração à rede. Esse processo é possível para casos onde a tensão de geração é suficientemente grande para não necessitar de elevação, apenas necessitando da conversão CC/CA (ALMADA, 2013). Essa configuração é apresentada na Figura 9.

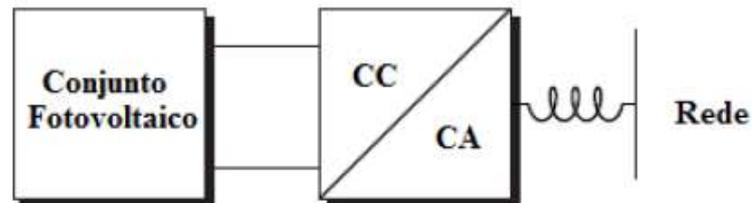


Figura 9 – Representação de um sistema de conversão de estágio único para sistema fotovoltaico
(Fonte: Leon, 2014)

Em sistemas de conversão de dois estágios, como apresentado na Figura 10, a tensão de geração não é suficientemente alta para conexão em estágio único. Assim, é necessário utilizar um conversor que elevará a tensão gerada, mantendo-se em CC. O equipamento utilizado nesta etapa é chamado de conversor *Boost*. Com esse equipamento eletrônico, é possível obter uma tensão de saída adequada para a conversão CC/CA no inversor e, conseqüente, conexão à rede (ALMADA, 2013; LEON, 2014).

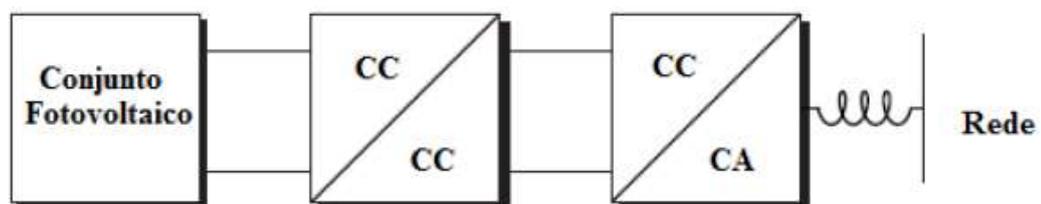


Figura 10 – Representação de um sistema de conversão de dois estágios para sistema fotovoltaico
(Fonte: Leon, 2014)

2.4.1 Conversor *Boost*

O conversor *Boost* é um equipamento eletrônico que realiza a elevação da tensão CC em um circuito. Seu princípio de funcionamento é baseado em um

transistor do tipo MOSFET de potência. Em referências como Rashid (2014) e Bezerra (2010) é apresentado o princípio de funcionamento desse equipamento.

Na literatura existem diferentes maneiras de representar um conversor *Boost*. Em Frigo (2013) é apresentado um modelo desse conversor. A partir desse estudo, será apresentada uma metodologia de modelagem do conversor.

Uma representação equivalente do circuito elétrico de um conversor *Boost* é apresentada na Figura 11.

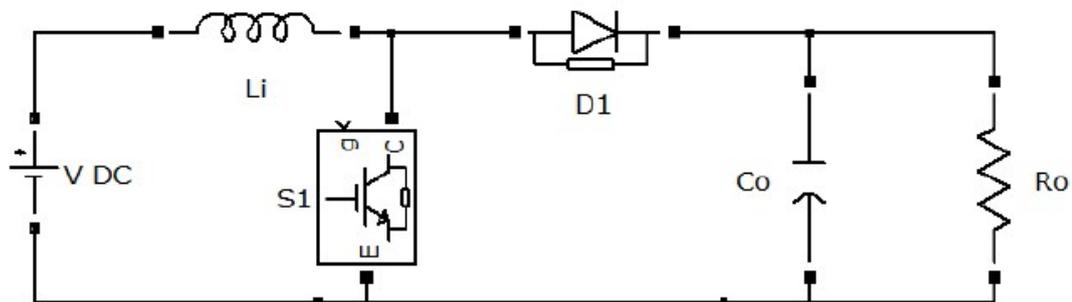


Figura 11 – Representação do circuito do conversor *Boost* (Fonte: Frigo, 2013)

Na Figura 11 são apresentados os componentes do conversor, sendo necessário para sua operação um indutor, um capacitor, um transistor do tipo MOSFET (S_1) e um diodo (D_1).

O diodo D_1 conduz no intervalo de tempo $(T, T+T_{on})$, dessa forma a tensão nos terminais de L_i é dada pelas seguintes Equações:

$$V_{L_i}(t) = V_{DC} \quad 0 < t < T_{on} \quad (1)$$

$$V_{L_i}(t) = V_{DC} - V_0 \quad T_{on} < t < T \quad (2)$$

Sabendo que, em regime permanente o valor médio da tensão nos terminais do indutor é nulo, o valor médio de V_0 pode ser calculado pela Equação (3).

$$V_{L_i}(regime) = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T_{on}} V_{DC} dt + \int_{T_{on}}^T (V_{DC} - V_0) dt \right] = 0 \quad (3)$$

A partir da Equação (3) é obtida uma relação entre as tensões V_{DC} e V_0 , sendo:

$$\frac{V_0}{V_{DC}} = \frac{1}{1-\delta} \quad (4)$$

O indutor L_i pode ser dimensionado com base na tensão de saída do conversor, de uma oscilação máxima de corrente no indutor (ΔI_{Li}) e da frequência de comutação (f_{PWM}). Assim o indutor é representado pela Equação 5.

$$L_i = \frac{V_o}{4 * \Delta I_{Li} * f_{PWM}} \quad (5)$$

Em relação ao capacitor C_0 , a tensão em seus terminais é praticamente constante, sendo que, quando o transistor conduz, a carga é mantida pelo capacitor. A Equação de projeto do capacitor é apresentada na Equação 6.

$$C_0 = \frac{\delta T * V_{DC}}{R_0 * \Delta V_0 (1 - \delta)} \quad (6)$$

2.4.2 Inversor de Frequência

Segundo Pinho (2014), um inversor é um dispositivo eletrônico que realiza a conversão da energia para CA, a partir de uma fonte de energia elétrica CC. O sinal de saída do inversor deve ter frequência, amplitude e conteúdo harmônico adequados a fim de não prejudicarem qualidade da energia na rede e no fornecimento as cargas. Além disso, a tensão de saída do inversor deve estar sincronizada com a tensão da rede no qual está conectado. O princípio de funcionamento desse equipamento é apresentado em referências como Rashid (2014) e Bezerra (2010).

Inversores de frequência são baseados na operação de dispositivos eletrônicos como transistores do tipo IGBT. Eles podem ser caracterizados por seu número de fases ou pela forma na qual ocorre a modelagem do sinal. A mais usual para dispositivos desse tipo é a PWM (*Pulse Width Modulation*) (FRIGO, 2013).

A Figura 12 apresenta o circuito de um inversor monofásico de ponte completa.

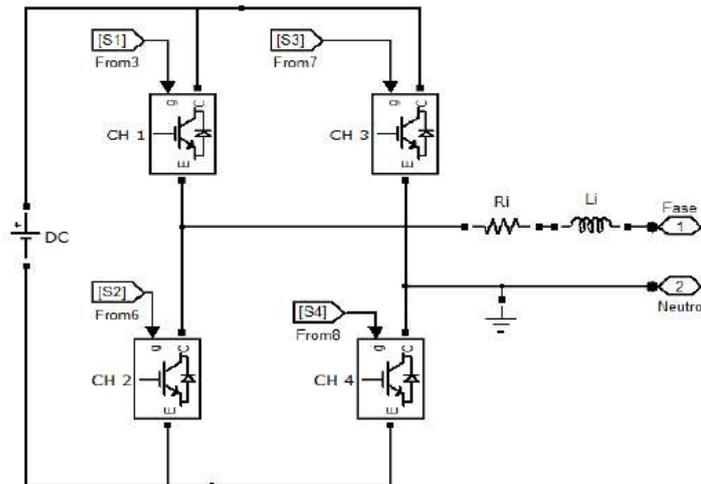


Figura 12 – Circuito equivalente de um Inversor monofásico de ponte completa (Fonte: Frigo, 2013)

A partir do circuito apresentado na Figura 12, é possível obter-se um sinal de onda alternado, porém caracterizado por uma onda quadrada, como exemplificado na Figura 13.

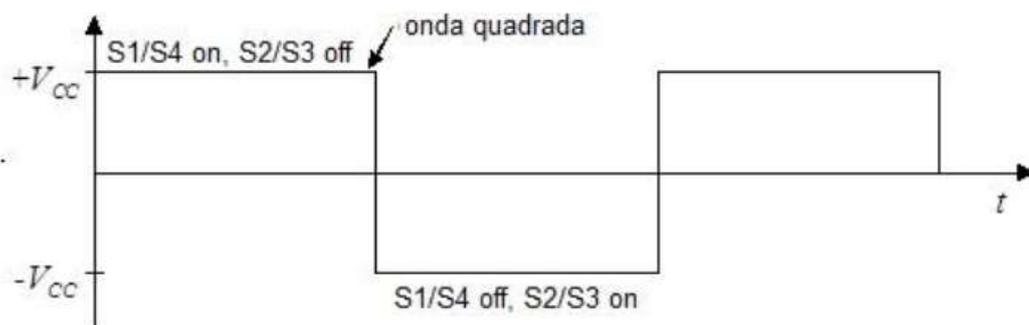


Figura 13 – Forma de onda quadrada na saída de um inversor sem modulação (Fonte: Pinho, 2014)

A fim de se obter um onda com características mais próximas a uma senóide, é necessário que se aplique à essa onda um sistema de modulação, entre os existentes pode-se destacar a modulação PWM. Essa modulação é baseada no acionamento dos dispositivos de chaveamento a uma frequência constante, da ordem de dezenas ou centenas de kHz, porém com um ciclo de trabalho variando ao longo do semiciclo proporcionalmente ao valor instantâneo de um sinal de referência (PINHO, 2014).

A modulação PWM é realizada pela comparação do sinal de referência, que é uma senóide na frequência da rede, com um sinal triangular de frequência muito superior. Quando a tensão de referência possui valor superior à onda triangular,

apenas as chaves S1/S4 conduzem e aplica-se uma tensão positiva na carga. No momento em que a tensão de referência é inferior à da onda triangular apenas as chaves S2/S3 conduzem e a carga recebe tensão negativa. A Figura 14 apresenta uma representação da modulação PWM (PINHO, 2014).

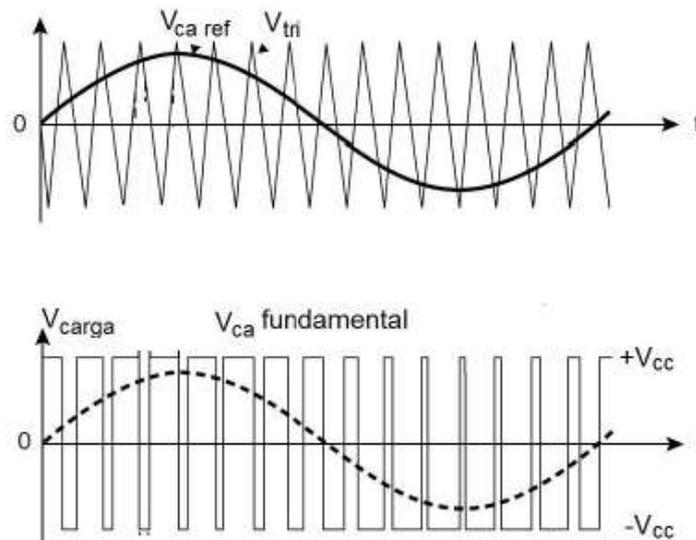


Figura 14 – Modulação PWM de um sinal na saída de um inversor (Fonte: Pinho, 2014)

2.5 Qualidade de Energia

O fornecimento de energia elétrica deve abranger requisitos mínimos de qualidade. De modo geral, os parâmetros de qualidade da energia elétrica são relacionados a amplitude e a forma de onda da tensão disponibilizada (FRIGO, 2013).

Segundo o módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) a qualidade da energia caracteriza os fenômenos e estabelece os parâmetros e os valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão (ANEEL, 2015).

Dentre os aspectos que avaliam a qualidade da energia elétrica pode-se destacar o nível de tensão em regime permanente e o teor harmônico.

2.5.1 Níveis de tensão em regime permanente

O módulo 8 do PRODIST estabelece três níveis relacionados a tensão, sendo eles: Adequado, Precário e Crítico. São estabelecidos intervalos de tensão para as diferentes tensão nominais existentes, desde tensões superiores a 230 kV até tensões de 127 V. Neste documento são apresentados os níveis definidos para todas as tensões de referências usuais no Brasil. A Tabela 2 apresenta as faixas que caracterizam os níveis de tensão para a referência de 380/220 V (ANEEL, 2015).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixas de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202)$ ou $(231 < TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117)$ ou $(133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233)/(TL < 110$ ou $TL > 135)$

Tabela 2 – Classificação de tensões para pontos de conexão em tensão nominal de 380/220 V
(Fonte: ANEEL, 2015 - Adaptado)

2.5.2 Harmônicos

Distorções harmônicas são fenômenos relacionados à deformações nas ondas de tensão e corrente em relação a uma onda senoidal de frequência fundamental (ANEEL, 2015).

O módulo 8 do PRODIST apresenta as expressões com as quais pode-se calcular a distorção harmônica individual e total de tensão, sendo respectivamente, $DIT_h\%$ e $DITT\%$ (ANEEL, 2015).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (7)$$

$$DITT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (8)$$

Onde V_h é a tensão harmônica de ordem h e V_1 é a tensão fundamental medida.

Segundo o módulo 8 do PRODIST, existem valores de referências nos quais não devem ser ultrapassados (ANEEL, 2015). As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores máximos permitidos para a distorção harmônica total e individual respectivamente.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	3

Tabela 3 – Valores de referência para a distorção harmônica total (em porcentagem da tensão fundamental) (Fonte: ANEEL, 2015 - Adaptado)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Tabela 4 - Valores de referência para a distorção harmônica individual (em porcentagem da tensão fundamental) (Fonte: ANEEL, 2015 - Adaptado)

3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho estão descritos nas seções que se seguem.

3.1 Descrição da Microrrede

Nesse trabalho desenvolveram-se simulações de uma microrrede unifilar operando em baixa tensão, sendo 380/220 V. A tipologia desenvolvida foi baseada no processo metodológico elaborado por Frigo (2013), com complementariedade de trabalhos relacionados. No presente estudo a ferramenta utilizada para a realização das simulações foi o MATLAB/SIMULINK.

A microrrede desenvolvida possui características construtivas semelhantes a redes de alimentação residenciais de pequeno porte. Na metodologia elaborada, as cargas foram distribuídas em 5 barramentos da microrrede a fim de simplificar as simulações. A Figura 15 apresenta a microrrede simulada, contendo todos os componentes que foram inseridos no modelo.

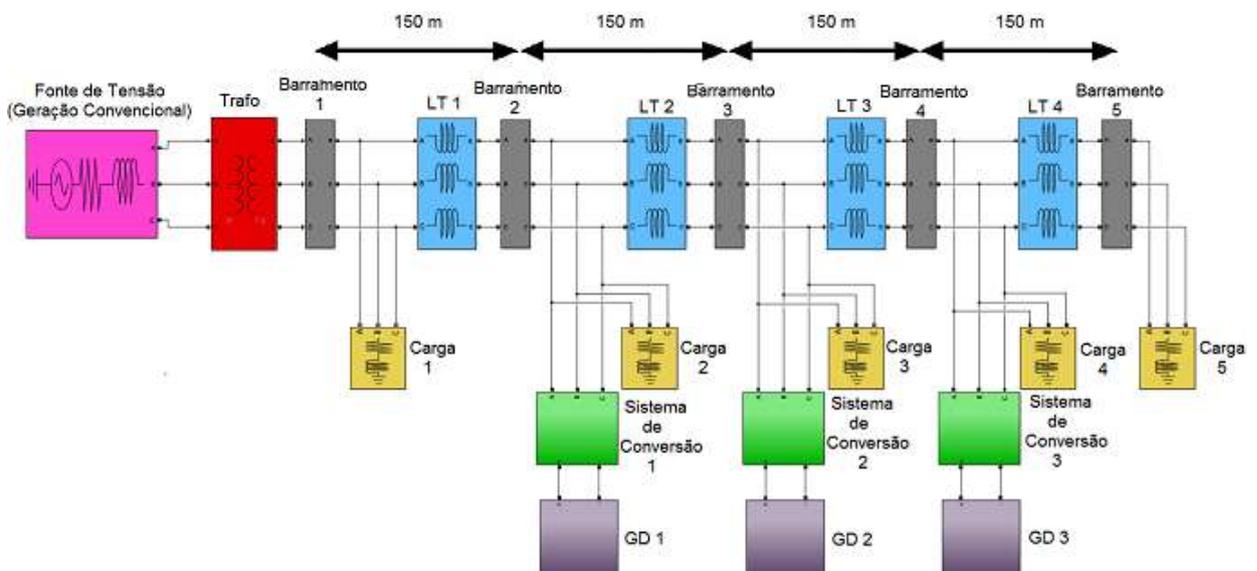


Figura 15 – Representação da microrrede simulada

O modelo desenvolvido apresenta um comprimento total de 600 m, sendo segmentado por 5 barramentos distanciados 150 m entre si. Nesses barramentos, apresentados na Figura 15, são conectas as cargas e as gerações fotovoltaicas.

Conforme a Figura 15, a microrrede simulada possui os seguintes componentes: 5 barramentos, 4 trechos de linhas de transmissão, 5 grupos de cargas, 3 grupos de geração distribuída, 3 sistemas de conversão, um transformador de distribuição e uma fonte de tensão que representa a rede de alta tensão.

3.1.1 Rede de alta tensão

Foi utilizada uma fonte de alimentação trifásica senoidal de 13,8 kV e 60 Hz para representar o sistema de alta tensão no qual a microrrede está conectada.

Admitiu-se que a fonte de alimentação é bem mais robusta que a microrrede modelada, com uma potência bem superior a demandada pelo sistema analisado, podendo assim representar a rede elétrica externa.

3.1.2 Transformador de distribuição

Com o intuito de representar a conexão da microrrede com um sistema de alta tensão, utilizou-se um transformador de distribuição para ligar a microrrede com uma fonte de alimentação de alta tensão.

O transformador utilizado nesse trabalho possui a configuração Δ -estrela aterrada. A escolha por esta configuração se deu pelo fato de assim, representar com maior fidelidade os sistemas reais, pois esta configuração é a mais usual em sistemas de distribuição de energia. Além disso, a configuração com Δ no lado primário impede a penetração da terceira harmônica na microrrede, sendo retida e assim, não afetando a qualidade da energia.

Para o modelo utilizou-se um transformador de 75 kVA. Com um transformador dessa potência, torna-se possível o abastecimento de todos os cenários de cargas a serem simulados nesse trabalho.

3.1.3 Linhas de Distribuição da microrrede

Diferentes modelos podem representar linhas de distribuição, sendo baseadas principalmente em sua impedância série e sua capacitância *shunt*. Neste modelo, devido ao pequeno comprimento em análise, é negligenciada a influência da capacitância *shunt*, pois estas não possuem grande influência em linhas curtas.

Desse modo, a linha de distribuição do modelo é composta apenas por sua impedância série, ou seja, por sua resistência R_L e por sua reatância X_L .

Os valores de R_L e X_L foram retirados de um projeto de uma rede de distribuição ligada a Eletrosul, apresentada em (ELETROSUL, 2010).

Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 2.

$R (\Omega/km)$	$L (mH/km)$
0,1153	0,9313

Tabela 5 – Parâmetros dos condutores usados nas Linhas de Transmissão

3.1.4 Cargas

Nas simulações desenvolvidas, as cargas modeladas possuem caráter linear, sendo que foram representadas como cargas resistivas-indutivas com fator de potência definido como 0,95 indutivo. A partir das cargas conectadas na microrrede, serão definidas os diferentes cenários simulados nesse trabalho.

Como foi verificado na Figura 15, as cargas foram concentradas nos barramentos. Dessa forma em vez de haver diversos pontos de conexões de cargas pela microrrede, optou-se por reuni-las nesses barramentos.

As cargas foram analisadas como estando todas equilibradas, assim não gerando problemas como desequilíbrio de tensão entre as fases.

3.1.5 Geração Fotovoltaica Distribuída

Conforme a Figura 15, foram modelados 3 sistemas de geração fotovoltaicos idênticos que foram distribuídos pela microrrede. Cada sistema fotovoltaico conectado a um barramento é caracterizado por ser subdividido em 3 sistemas menores. Essa divisão é realizada para que se modelem os sistemas visando conexões monofásicas com a microrrede. Havendo 3 subsistemas, pode-se conectar cada geração em uma das fases, assim enviando a mesma quantidade de energia por fase.

Esta geração foi introduzida no modelo através de um bloco próprio que existe na biblioteca do MATLAB/SIMULINK. Esta ferramenta utiliza-se do banco de dados presente no *software* SAM (*System Advisor Model*), desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), para representar o sistema de geração.

Nesse trabalho, foi utilizado o *software* SAM para realizar um dimensionamento inicial a fim de obter as capacidades de geração necessária para cada cenário simulado, além de definir o módulo usado na simulação e do arranjo entre os módulos. Após essa definição, foram inseridas as informações obtidas pelo SAM no bloco específico no MATLAB/SIMULINK. A Figura 16 apresenta a interface do bloco que representa o sistema fotovoltaico. Nessa figura são apresentados os parâmetros necessários para simular um dos cenários desenvolvidos, além disso o módulo fotovoltaico escolhido para as simulações é o Sunrise Solartech SR-P660230.

Parameters		Advanced
Array data		
Parallel strings	<input type="text" value="5"/>	
Series-connected modules per string	<input type="text" value="7"/>	
Module data		
Module:	Sunrise Solartech SR-P660230	
<input type="checkbox"/> Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected		
Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)	
<input type="text" value="230.044"/>	<input type="text" value="60"/>	
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)	
<input type="text" value="35.84"/>	<input type="text" value="8.56"/>	
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)	
<input type="text" value="28.9"/>	<input type="text" value="7.96"/>	
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	
<input type="text" value="-0.35871"/>	<input type="text" value="0.065199"/>	
Display I-V and P-V characteristics of ...		
array @ 25 deg.C & specified irradiances		
Irradiances (W/m2)	<input type="text" value="[1000 250]"/>	
<input type="button" value="Plot"/>		
Model parameters		
Light-generated current IL (A)	<input type="text" value="8.5753"/>	
Diode saturation current IO (A)	<input type="text" value="2.7818e-10"/>	
Diode ideality factor	<input type="text" value="0.96359"/>	
Shunt resistance Rsh (ohms)	<input type="text" value="180.2635"/>	
Series resistance Rs (ohms)	<input type="text" value="0.32235"/>	

Figura 16 – Interface da ferramenta utilizada para implementar o sistema de geração fotovoltaica nas simulações

Esta ferramenta para o modelo é baseada principalmente em dois sinais como perfis de entrada, representando a variação da irradiação e da temperatura do módulo. A entrada referente à irradiação representa a caracterização diária de seu perfil e a entrada referente à temperatura representa a variação temporal da temperatura do módulo conforme a incidência de radiação existente.

3.1.6 Sistema de conversão

Com a geração fotovoltaica já modelada, é necessário que se adeque a energia gerada aos padrões estabelecidos para que se injete à rede e utilize-a nas cargas.

Para isso, modelou-se um sistema de conversão de dois estágios, contendo um conversor *Boost* e um inversor.

A Figura 17 apresenta o circuito equivalente ao conversor *Boost* desenvolvido para esse trabalho. O conversor é conectado à saída do sistema de geração e eleva a tensão a um valor de $\sqrt{2}$ maior que a tensão da rede (380 V).

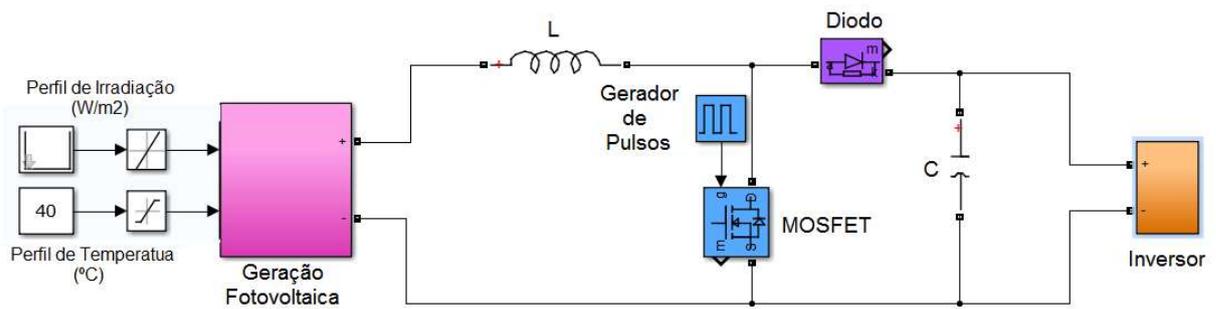


Figura 17 – Representação do conversor *Boost*

A jusante do conversor *Boost*, após haver elevação de tensão CC, é necessário a inclusão de um inversor de frequência para realizar a conversão de CC para CA. A Figura 18 apresenta uma representação equivalente do inversor utilizado no modelo. O inversor modelado é do tipo monofásico de ponte completa com modulação PWM.

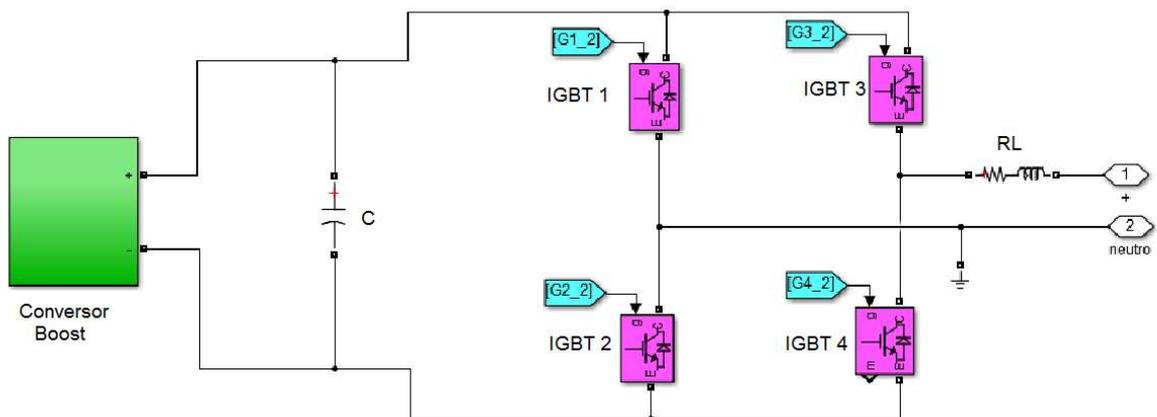


Figura 18 – Representação do inversor

Cada sistema de conversão é composto por 3 conversores *boost* e 3 inversores monofásicos, onde cada um é conectado a uma das fases. Como a geração a ser inserida na rede é equilibrada, possuindo mesma potência instalada, cada fase receberá a mesma quantidade de energia.

Nota-se que na Figura 18, foi alocado um capacitor C entre as conexões do conversor *Boost* e o inversor. Esse capacitor é denominado capacitor de desacoplamento de potência. Além disso na saída do inversor existe uma resistência e um indutor em série, representando perdas no inversor e um filtro indutivo que limita a oscilação de corrente, respectivamente.

3.2 Descrição geral dos cenários simulados

Foram desenvolvidos um total de 12 cenários, onde buscou-se variar as cargas conectadas à microrrede e às gerações existentes. Esses diferentes cenários foram desenvolvidos para analisar a variabilidade do impacto ocasionado sobre a qualidade da energia ao decorrer da microrrede.

Os cenários foram divididos através de três níveis de carga, sendo eles denominados de cargas pesada, intermediária e leve. Para cada um nível de carga foi analisado o impacto de inclusão de 4 variações de geração de energia, sendo máxima, mediana, baixa e sem geração.

Para todos os cenários de carga, as gerações fotovoltaicas estão inseridas nos barramentos 2,3 e 4, conforme a Figura 15, sendo que a potência a ser injetada por cada nível de geração é apresentado na Tabela 6.

	Barramento				
	1	2	3	4	5
	Potência a ser injetada (kW)				
Sem GD	0	0	0	0	0
Baixa	0	3,5	3,5	3,5	0
Mediana	0	5,5	5,5	5,5	0
Máxima	0	8	8	8	0

Tabela 6 – Níveis de geração inclusos nas simulações

3.2.1 Cenário 1 – Grupo de simulações com carga pesada

Nesse cenário está conectado à microrrede uma carga total de 70 kW, sendo distribuída igualmente entre os 5 barramentos, havendo assim uma carga de 14 kW por barramento. Essa carga, por barramento, é equivalente a aproximadamente 10 residências típicas que apresentam um ponto máximo em sua curva de carga por volta de 1,4 kW (FRANCISQUINI, 2009).

Os níveis de geração apresentados na Tabela 6 correspondem a aproximadamente 34, 23 e 15% da potência necessária para suprir as cargas desse cenário com geração máxima, mediana e baixa respectivamente.

3.2.2 Cenário 2 – Grupo de simulações com carga intermediária

O segundo cenário é composto por uma carga total de 45 kW, sendo distribuída igualmente entre os 5 barramentos, havendo assim uma carga de 9 kW por barramento. Essa carga, por barramento, é equivalente a aproximadamente 7 residências típicas que apresentam uma carga média próxima de 1,4 kW. (FRANCISQUINI, 2009)

Os níveis de geração apresentados na Tabela 6 correspondem a aproximadamente 53, 37 e 24% da potência necessária para suprir as cargas desse cenário com geração máxima, mediana e baixa respectivamente.

3.2.3 Cenário 3 – Grupo de simulações com carga leve

O último cenário é composto por uma carga total de 30 kW, sendo distribuída igualmente entre os 5 barramentos, havendo assim uma carga de 6 kW por barramento. Essa carga, por barramento, é equivalente a aproximadamente 4 residências típicas que apresentam um ponto máximo em sua curva de carga por volta de 1,4 kW. (FRANCISQUINI, 2009)

Os níveis de geração apresentados na Tabela 6 correspondem a aproximadamente 80, 55 e 35% da potência necessária para suprir as cargas desse cenário com geração máxima, mediana e baixa respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos através de todas as simulações realizadas no ambiente MATLAB/SIMULINK para o desenvolvimento desse trabalho.

Serão apresentados os resultados referentes aos seguintes parâmetros: níveis de tensão, queda de tensão, fluxo de potência e distorção harmônica. Os respectivos dados foram obtidos através de medidores alocados nos 5 barramentos da microrrede, tornando possível visualizar suas variações durante toda a extensão dos modelos desenvolvidos.

4.1 Cenário 1 – Grupo de simulações com carga pesada

Com a análise da microrrede é possível verificar o comportamento de parâmetros ligados a qualidade da energia elétrica ao decorrer de seu comprimento. Na Figura 19 é apresentado a tensão de linha em cada barramento da microrrede.

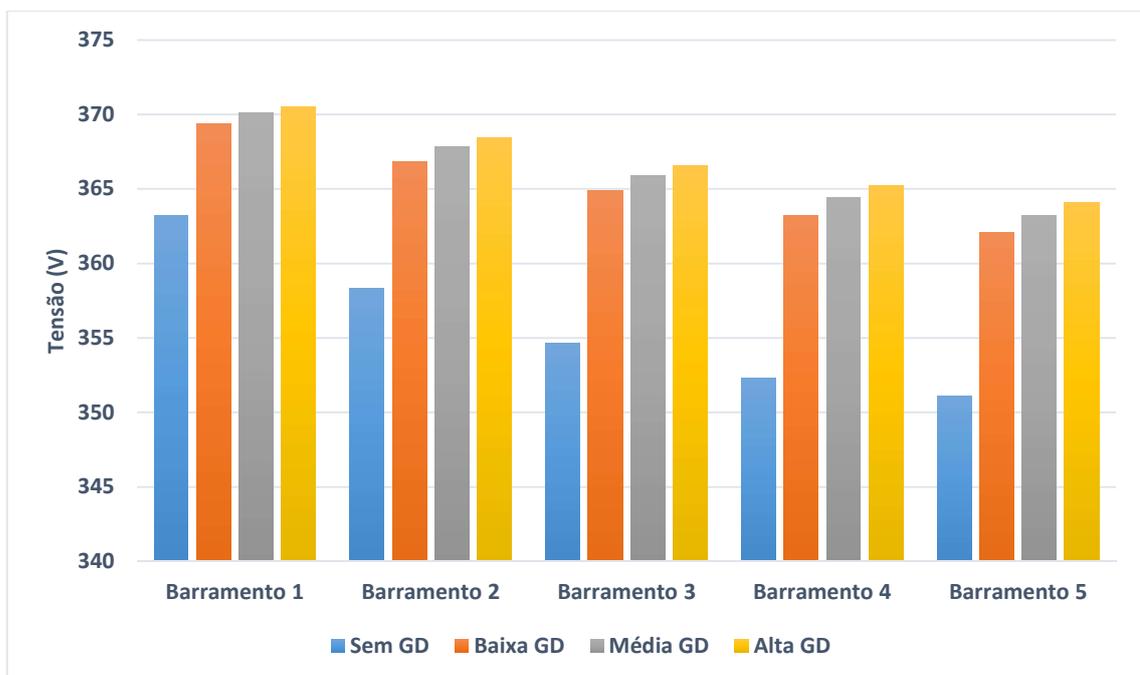


Figura 19 – Variação da tensão na microrrede

É possível verificar que a tensão medida em cada barramento vai sendo reduzida ao decorrer da microrrede e que a inclusão das gerações distribuídas ocasionam melhoras perceptíveis no nível de tensão analisado.

Foi verificado que para esse cenário de carga sem inserção de geração, a tensão medida no final da microrrede apresentou um valor bem próximo a faixa de tensão considerada precária pela ANEEL (350 V) para sistemas com tensão de referência de 380 V.

A partir da inserção dos sistemas de geração observou-se uma melhora progressiva nos níveis de tensão na microrrede, sendo que no barramento 5, elevou-se a tensão em 13 V, considerando os casos simulados sem geração, tensão de aproximadamente 351 V e com geração alta, com tensão de aproximadamente 364 V.

A Figura 20 apresenta um comparativo entre as tensões verificadas e a tensão de referência da microrrede (380 V).

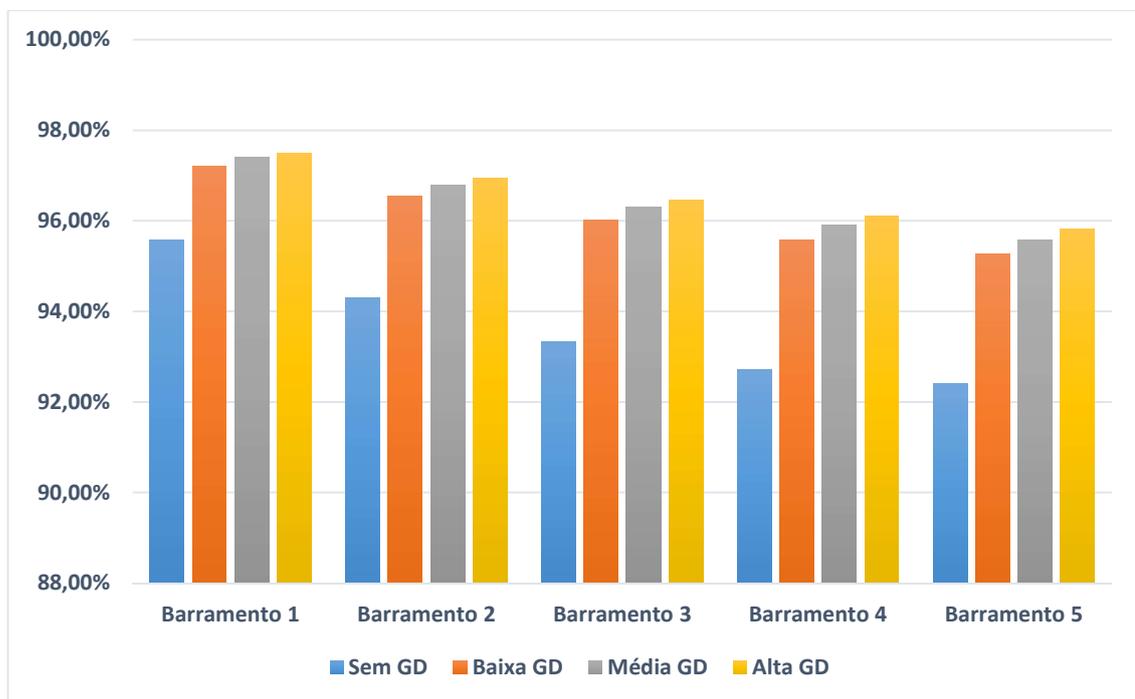


Figura 20 – Porcentagem da tensão de referência verificada

Em todos os casos de inserção de geração, foi apresentado melhora nos níveis de tensão, verificando assim reduções da queda de tensão existente. Para o barramento 5, onde são verificados os menores níveis de tensão, alcançou-se entre

95 e 96% da tensão de referência para todos os casos de inserção de geração, e apenas 92 % para o cenário sem geração, evidenciando assim a melhora.

A Figura 21 apresenta o comportamento da potência ativa na microrrede. Os valores apresentados são medidos nos barramentos e representam a potência absorvida da rede externa.

É verificado que, com os diferentes cenários de geração, conseguiu-se reduzir os valores medidos para os mesmos barramentos. Desta forma, a medida que exista maior geração conectada, a demanda provinda da rede será reduzida, pois a geração existente estará suprindo de forma proporcional a carga conectada.

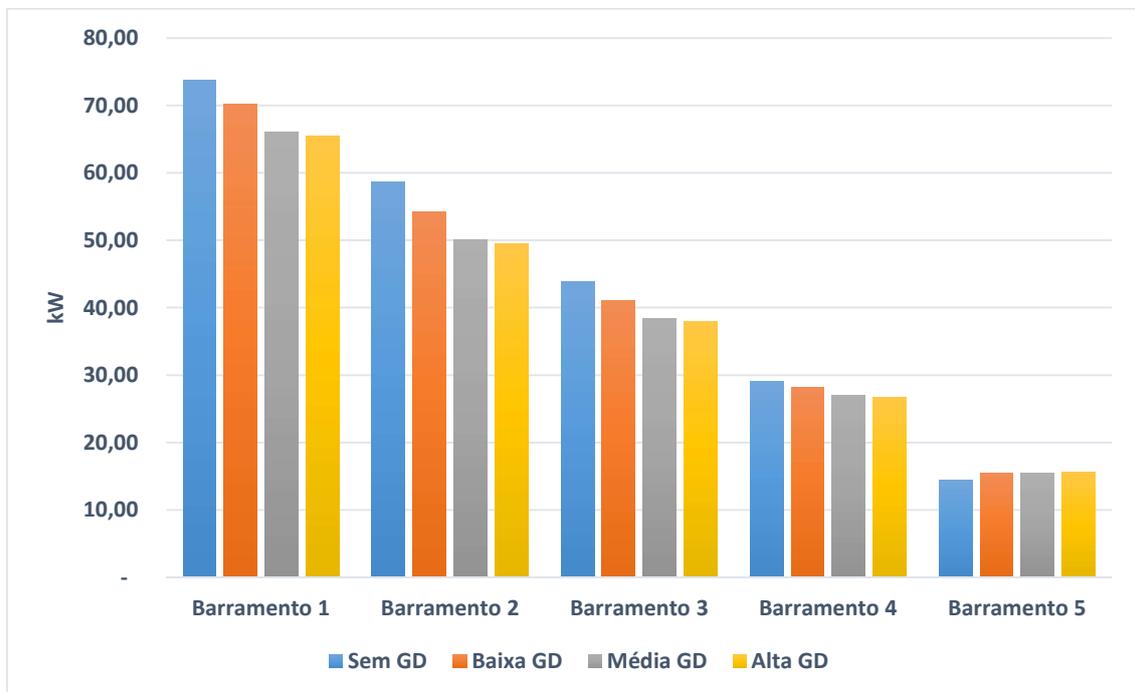


Figura 21 – Potência Ativa na microrrede

Para o barramento 1, é visto que a potência ativa medida é superior a demandada pela cargas. Este fato é justificado pela perdas existentes no sistema, principalmente as relacionadas ao transporte da energia pelas linhas de transmissão.

A Figura 22 apresenta o comportamento da potência reativa pela microrrede. O comportamento apresentado é semelhante ao verificado com a potência ativa.

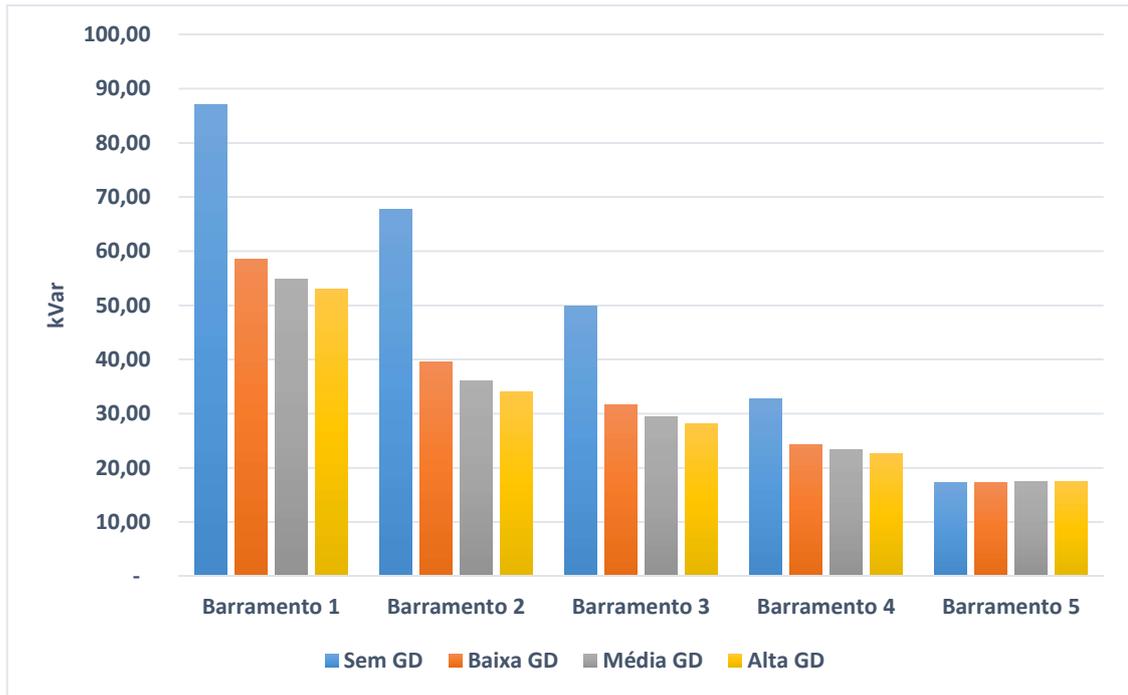


Figura 22 – Potência Reativa na microrrede

4.2 Cenário 2 – Grupo de simulações com carga intermediária

No segundo cenário simulado, onde é verificado o impacto da inserção da geração com uma carga inferior ao cenário anterior. Na Figura 23 são apresentados os níveis de tensão nos barramentos da microrrede.

Conforme o esperado, a tensão se comporta como no cenário anterior, sendo reduzida ao decorrer da microrrede e com melhora de tensão com o aumento da microgeração inserida.

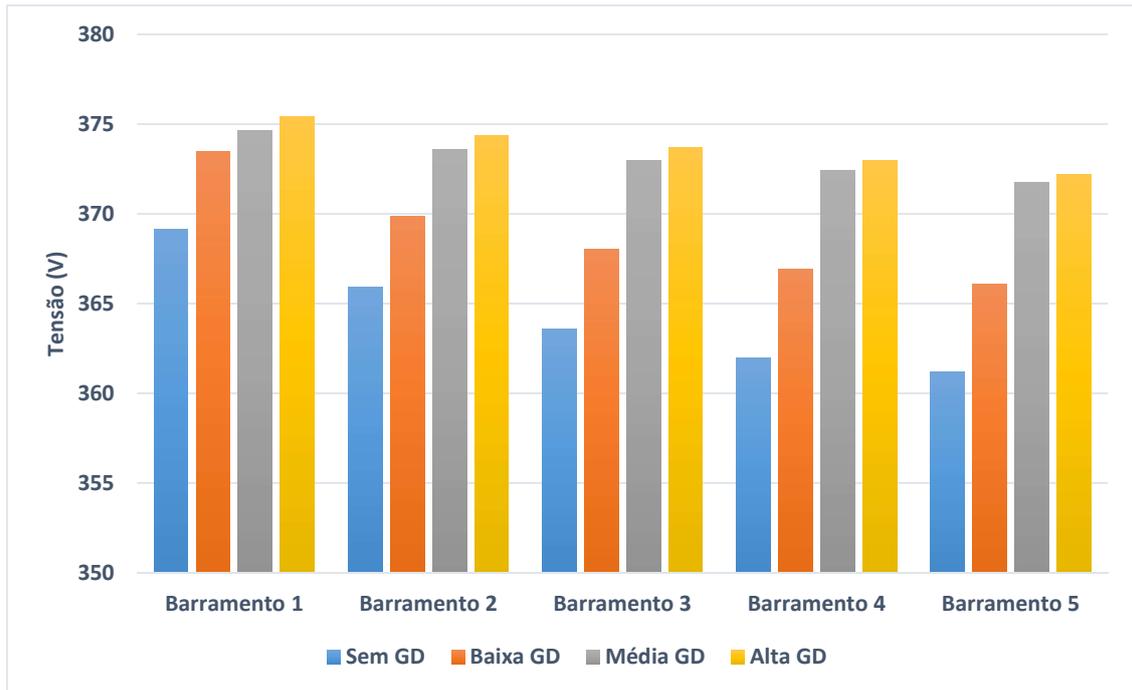


Figura 23 – Variação da tensão na microrrede

A Figura 24 apresenta a porcentagem da tensão de referência atingida em cada barramento analisado.

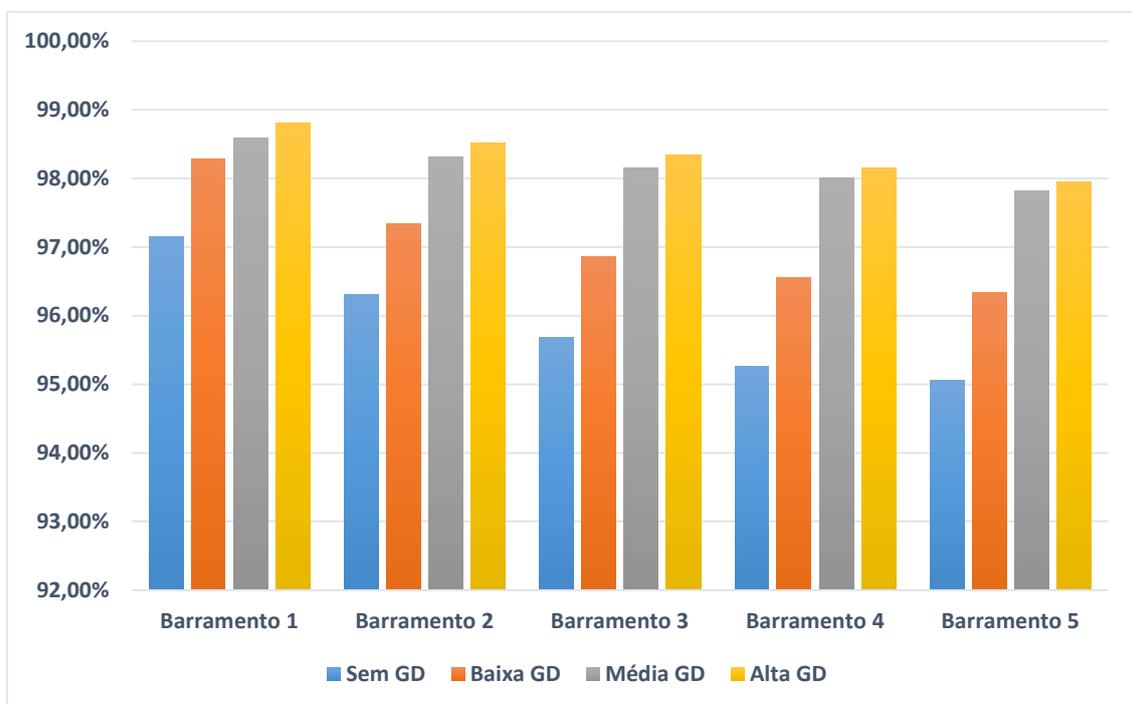


Figura 24 – Porcentagem da tensão de referência

Com a redução da carga para esse cenário e aumentando a representatividade da geração distribuída no fornecimento de energia visualizaram-se menores quedas

de tensão na microrrede. Na análise com alta geração, a tensão em todos os barramentos esteve próxima ou acima dos 98% da tensão de referência. Os valores apresentados, novamente representam a redução da queda de tensão na microrrede.

A Figura 25 apresenta a potência ativa absorvida da rede externa nesse novo cenário. Nota-se que não existe grande variação da potência ativa mensurada nos barramentos 2, 3 e 4 para a simulação com alta geração. Isto ocorre pelo fato de as cargas conectada (9 kW) serem quase que totalmente abastecida pela geração acoplada nos próprios barramentos (8 kW). Novamente é verificado no barramento 1 a existência de uma potência maior que demanda, sendo ocasionada devido a existência de perdas no sistema.

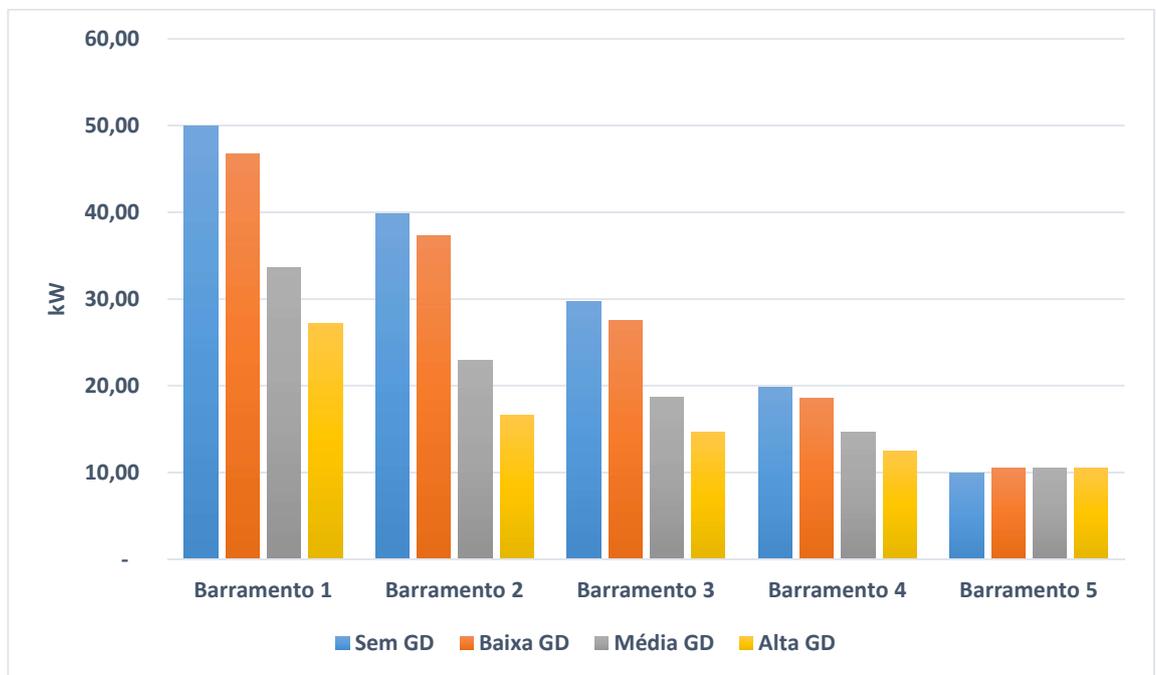


Figura 25 – Potência Ativa na microrrede

A Figura 26 representa as potências reativas medidas nos barramentos. Como era de se esperar, novamente possui a mesma característica da potência ativa.

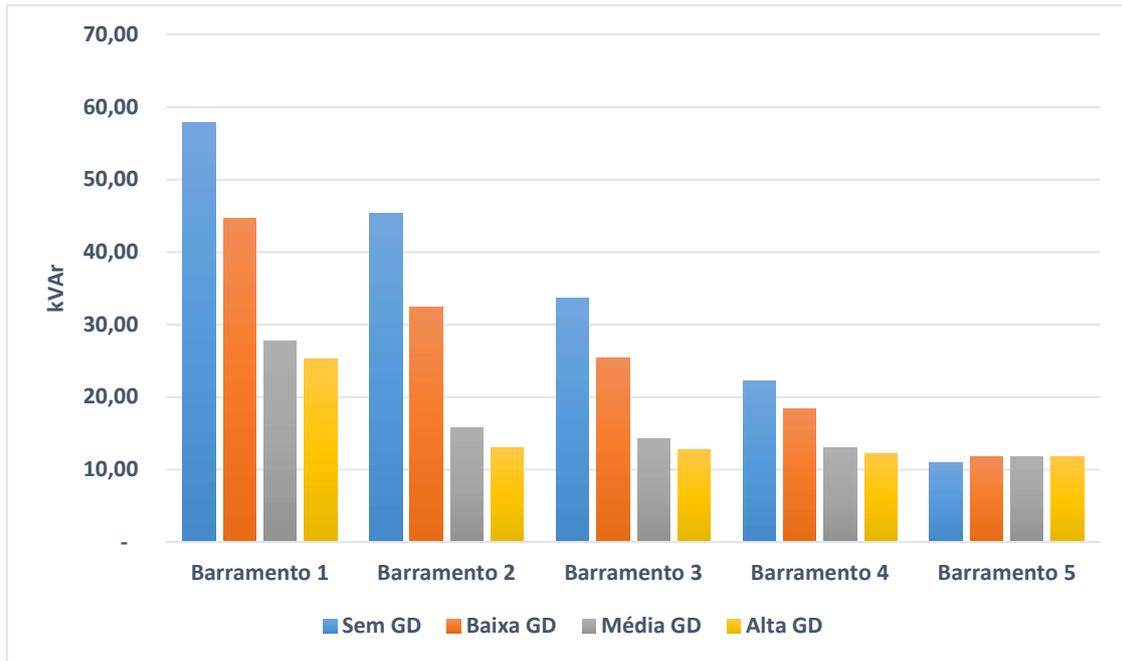


Figura 26 – Potência Reativa na microrrede

4.3 Cenário 3 – Grupo de simulações com carga leve

A análise para o terceiro e último cenário simulado apresentou as menores cargas, assim como já apresentada, ocorre a maior representatividade no abastecimento das cargas através das gerações distribuídas.

A Figura 27 apresenta as tensões verificadas em cada barramento da microrrede. Verifica-se que, para a simulação com alta geração são obtidos valores bem próximos à tensão de referência da rede, mantendo um excelente aspecto relacionado a esse parâmetro perante a qualidade da energia.

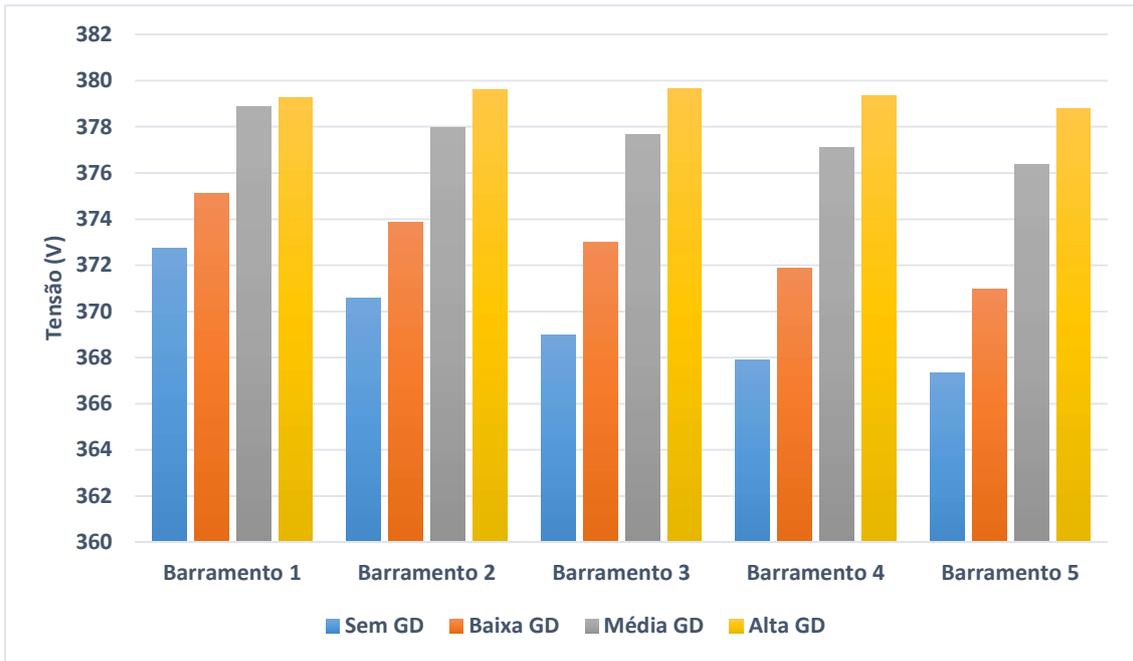


Figura 27 – Variação de tensão na microrrede

A Figura 28 apresenta a proximidade dos níveis de tensão analisados com relação a tensão de referência nesse cenário. Devido as cargas serem as menores de todas as simulações apresentadas, a queda de tensão não é muito evidenciada, mas mesmo assim a inserção de geração distribuída traz benefícios, melhorando os níveis de tensão principalmente ao final da microrrede.

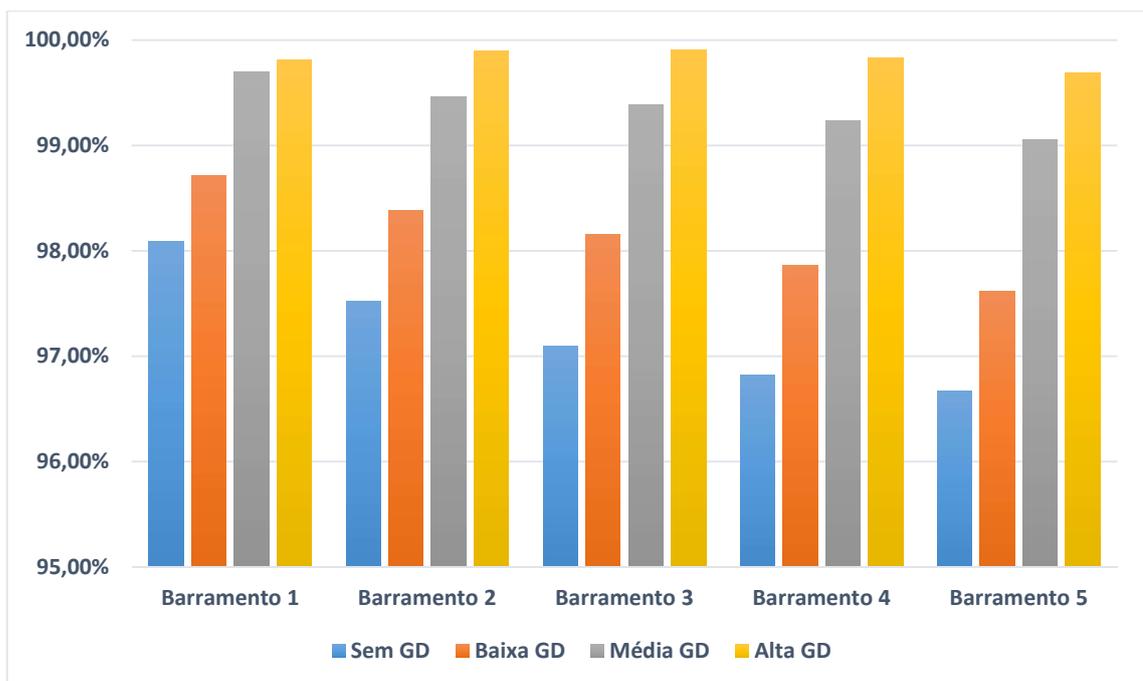


Figura 28 - Porcentagem da tensão de referência verificada

A Figura 29 apresenta a potência ativa mensurada nos barramentos da microrrede. Nesse caso, estas medições não representam apenas a potência ativa drenada da rede. Entre os barramentos 2 e 5 é verificado um aumento na potência ativa medida. Esse fato ocorre pois, para esse cenário de análise, a geração é maior que a carga presente nesse barramentos. Dessa forma, o pleno atendimento da carga de cada barramento ocorre pela geração local. Assim, existindo um excedente de geração, o fluxo de potência ativa é invertido e insere-se energia na microrrede.

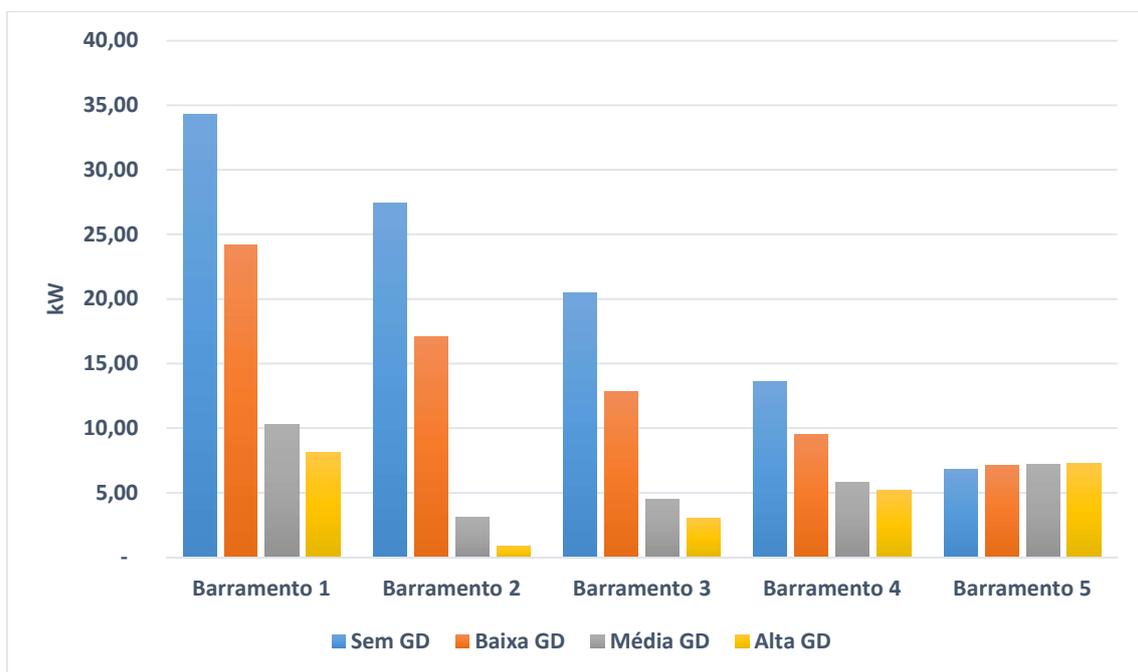


Figura 29 – Potência Ativa na microrrede

O mesmo comportamento é apresentado na Figura 30 para a potência reativa.

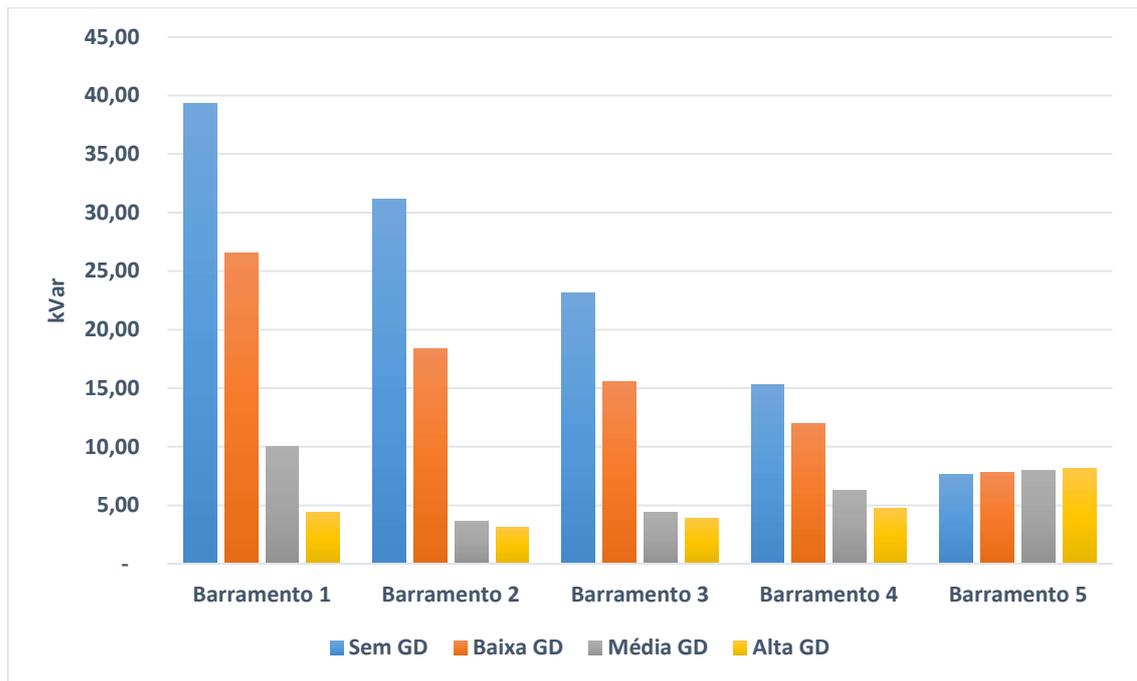


Figura 30 – Potência Reativa na microrrede

4.4 Análise do teor harmônico

Em todas as 14 simulações realizadas foram medidas as harmônicas presentes na microrrede nos 5 barramentos analisados. Em todos os casos foram verificados baixos níveis harmônicos, nunca ultrapassando um THD total de 2%, sendo assim, não demonstrando-se preocupantes em relação a qualidade de energia.

A fim de representar a análise do teor harmônico realizado, é apresentado na Figura 31 o resultado de uma medição desenvolvida através da análise FFT (*Fast Fourier Transform*) presente no MATLAB/SIMULINK. A Figura 31 é relacionada a um dos casos onde se verificou maior teor harmônico de tensão em um barramento da microrrede.

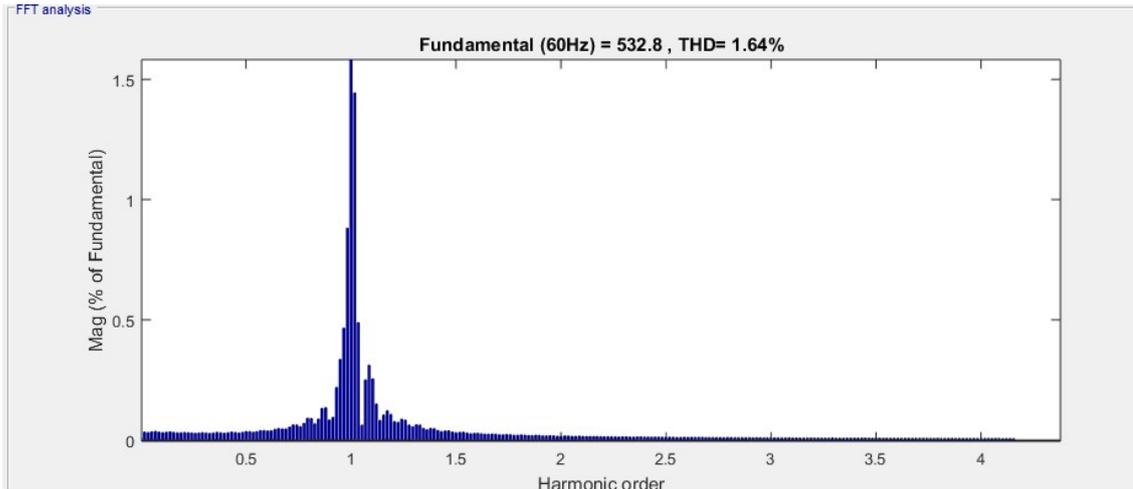


Figura 31 – Análise harmônica desenvolvida

Os baixos valores de harmônicas presentes nas simulações podem ser justificadas pelo fato dos inversores modelados possuírem modulação PWM e apresentarem frequências de chaveamento elevadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre o impacto que a inserção de fontes de geração distribuída acarretam na qualidade da energia em microrredes de baixa tensão. Para tanto, foram desenvolvidas simulações no *software* MATLAB/SIMULINK para mensurar os impactos positivos e negativos pela geração distribuída.

A fim de buscar este objetivo, foi modelada uma microrrede e os principais componentes necessários para inclusão da fonte geradora. Dessa forma, foram incluídos nas simulações: Representação de uma rede de alta tensão, transformador de distribuição, linhas de transmissão, sistema de conversão de energia e sistema de geração fotovoltaica.

O processo metodológico do presente trabalho baseou-se na elaboração de diferentes cenários que representem diferentes cargas conectadas e diferentes capacidades de geração de energia. Assim, foi elaborado um total de 12 simulações, com 3 níveis de carga (pesada, intermediária e leve) e para cada nível de carga foram implementados 4 sistemas de geração com capacidade diferentes (Sem geração, Baixa, média e alta).

Para se avaliar o impacto gerado foram medidos diferentes parâmetros em pontos específicos da microrrede. Com essas medições foi possível verificar o comportamento do nível de tensão por toda a microrrede, verificando que com a inclusão da geração distribuída foi possível melhorar satisfatoriamente os níveis presentes, chegando em um dos casos aumentar a tensão em quase 15 V. Além disso foi possível verificar o fluxo de potências ativa e reativa na microrrede, mensurando, para cada cenário, as potências geradas e a necessidade ainda existente de fornecimento da rede tradicional. Por fim foi verificado e quantificado o teor harmônico que a geração distribuída insere na rede. Verificou-se que os níveis existentes podem ser considerados não prejudiciais a microrrede.

Deste modo, a inserção de geração distribuída possui um caráter benéfico a redes de distribuição, no momento em que se está gerando energia com proximidade do uso final, evitam-se perdas de distribuição e serve como alternativa local para fornecimento.

IMPACT ANALYSIS OF DISTRIBUTED GENERATION INCLUSION IN THE QUALITY ENERGY IN A LOW VOLTAGE MICROGRID

ABSTRACT

With the current energy scenario, which increasingly seeks a decentralization of power generation. It's indicates the need to evaluate the impact of new alternatives of distributed generation in the local distribution grid. Thereby the purpose of the present study is to perform an analysis of possible impacts associated with the energy quality caused by connection of photovoltaic microgeneration in a low voltage microgrid operating at steady state. Therefore, parameters were evaluated as voltage, voltage drop, active and reactive power flow and harmonic distortion. These analyses were performed on the software MATLAB/SIMULINK, for different scenarios, with different loads connected and different scenarios of distributed generation. In total 12 scenarios were developed for analysis. The simulations showed satisfactory results in terms of energy quality in the microgrid after the connection of distributed generation, being checked substantial improvements in the voltage levels, reaching reduction of 10% in the voltage drop without insertion of harmonics in a large scale, always near 2%.

REFERÊNCIAS

- ALMADA, Janaína Barbosa. **Modelagem, controle e gerenciamento da operação de microrredes com fonte renovável**.2013. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Revisão 7, 2015.
- BEZERRA, Luiz Daniel S.. **Conversor CC-CA para aplicações em sistemas autônomos de energia elétrica**. 2010. 276 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- CABRAL, Claudia Valéria T. et al., **Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico**. Junho, 2014
- ELETROSUL. **Projeto básico de Linha de Transmissão – Características elétricas referentes ao projeto de construção**. 2010

FRANCISQUINI, Aislan Antonio. **Estimação de Curvas de Carga em Pontos de consumo e em Transformadores de Distribuição**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado) -Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de São Paulo, 2009.

FRIGO, Murilo Miceno. **Impacto da microgeração de energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão**.2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2013.

GALHARDO, Marcos André Barros; PINHO, João Tavares. **Avaliação da Qualidade de energia Fornecida por Sistema renováveis Isolados de Pequeno Porte**,2011.

HARTONO, B S; BUDIYANTO; SETIABUDY, Rudy. Review of microgrid technology. **2013 International Conference On Qir**,[s.l.], Jun. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/qir.2013.6632550>.

JEON, J.-H. et al. **Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid**. Power Electronics, IEEE Transactions on , v. 25, n. 12, p. 2919 - 2929, Dezembro 2010.

KHANH, L. N. et al. **Power-Management Strategies for a Grid-Connected PV-FC Hybrid System**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 25, n. 3, p. 1874 - 1882, Julho 2010.

LEÓN, David Rodrigo Franco. **Modelo de simulação para avaliar a inserção de um sistema fotovoltaico a um microrrede elétrica**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2014.

LOPES, Yona, FERNANDES, Natalia Casto, SAADE, Débora Christina. **Geração Distribuída de Energia: Desafios e Perspectivas**. 2015

MAHMOUD, Magdi S.; A.L.-SUNNI, Fouad M.; RAHMAN, Mohamed Saif Ur. Review of microgrid architectures – a system of systems perspective. **IET Renewable Power Generation**, [s.l.], v. 9, n. 8, p.1064-1078, 1 nov. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0171>.

PATRÃO, Iván et al. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Valencia, p.415-424, 2015.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014. xxii, 883 p. ISBN 9788543005942.

REY-LÓPEZ, Juan Manuel et al. Generalities about design and operation of microgrids. **Dyna**, Medellín, p.109-119, fev. 2015.

SABZEHGAR, Reza. A review of AC/DC microgrid-developments, technologies, and challenges. **2015 IEEE Green Energy And Systems Conference (igesc)**, [s.l.], 9 nov. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/igesc.2015.7359384>.

SHAYANI, Rafael Amaral. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. 2010. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2010.

TAHIM, André Pires Nóbrega. **Controle de microrredes de distribuição de energia elétrica em corrente contínua**. 2015. 205 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

TAVARES, João Pinho; GAUDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

WANWAN, Xu; YAN, Cheng; BIN, Wang. Microgrid influence on power quality of distribution system and its solution. **2014 International Conference On Power System Technology**, [s.l.], Out. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/powercon.2014.6993959>.

WRIGHT, James T.c. et al. TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SEUS IMPACTOS FUTUROS SOBRE EMPRESAS DE ENERGIA. **Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v. 6, n. 1, p.108-125, dez. 2009.

ZHANG, L. et al. **Power control of DC microgrid using DC bus signaling**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. Fort Worth: IEEE. 2011. p. 1926 - 1932.

ZHOU, Yang; HO, Carl Ngai-man. A review on Microgrid architectures and control methods. **2016 IEEE 8th International Power Electronics And Motion Control Conference (ipemc-ecce Asia)**, [s.l.], Maio 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/ipemc.2016.7512799>.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares por sempre estarem juntos nos melhores e também nos piores momentos que passamos durante esses 5 anos de minha graduação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por disponibilizar todo o necessário para realizar esse trabalho e toda a graduação.

À todos os professores que participaram de alguma forma em meu processo de graduação. Em especial ao professor Luciano Pfitscher Lopes por me auxiliar na elaboração de meu trabalho e pelo convívio durante os projetos de pesquisas desenvolvidos que propiciaram o aprofundamento em diversos temas.

À todos os amigos e colegas que estiveram constantemente presentes nessa minha formação.