

Estudo De Expansão Da Capacidade De Hospedagem De Fotovoltaicas Em Um Campus Universitário Sob A Óptica Da Sobretenção.

Joseph P. O. Schumann Minami
Universidade Federal de Itajubá
joseph@unifei.edu.br

Letícia S. Benso Maciel
Universidade Federal de Itajubá
leticiabenso@gmail.com

Prof. Benedito Donizeti Bonatto, Ph.D., IEEE
Senior Member
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
benedito.bonatto@gmail.com

Professor Eur.Ing. Paulo F. Ribeiro, BSEE,
MBA, PhD, PE, CEng, FIEEE, FIET
IEEE PES Distinguished Lecturer
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

Resumo — A inserção de geração distribuída (GD) no sistema elétrico pode gerar distúrbios na rede como por exemplo, alteração do fluxo de carga, alteração do nível de tensão, problemas com qualidade de energia, entre outros. Entretanto pode-se estabelecer limites, ou capacidade de hospedagem, para que se possa inserir GD sem que haja prejuízos ao sistema, ou seja, respeitando os limites estabelecidos por órgãos regulatórios e mantendo o sistema elétrico seguro e saudável. Este artigo tratará do estudo da capacidade de hospedagem de um campus universitário brasileiro cuja geração distribuída será realizada por painéis fotovoltaicos (PV) sob o ponto de vista da sobretenção.

Keywords— *geração distribuída, capacidade de hospedagem, qualidade de energia, sobretenção.*

I. INTRODUÇÃO

A configuração do Sistema de Energia Elétrica está prestes a passar por uma grande reestruturação física, econômica e regulatória, uma vez que há um aumento da utilização de geração distribuída (GD) principalmente advindas de fontes renováveis. Essa nova geração descentralizada oferece benefícios para o setor elétrico e também para os consumidores, pois evita perdas e minimiza a necessidade de estrutura de transmissão, uma vez que a carga se encontra ao lado da geração. O Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia [1] tem por objetivo incentivar e ampliar a utilização de GD, principalmente solar. O ProGD estima que até 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras (residências, comércios, indústrias, universidades entre outros) poderão gerar sua própria energia. O que pode resultar em até 23.500 MW de energia limpa e renovável produzida no país.

Para melhorar os estudos de potencial de geração e saber o quanto pode ser gerado e injetado na rede sem que haja prejuízo ao sistema elétrico convencional realiza-se estudos de capacidade de hospedagem. Nesses estudos pode-se determinar a melhor configuração da GD em que ela apresente maior benefício aos consumidores. Existem cuidados que devem ser levados em consideração durante a realização do estudo tais como: regulação de tensão, ajustes nos parâmetros

de proteção, parâmetros de qualidade de energia e nos índices de continuidade e confiabilidade da rede [2]. Deve-se também observar os possíveis impactos na operação e estabilidades do sistema [3].

Outro ponto importante quando se fala em GD são os aspectos regulatórios. No Brasil ainda não há uma legislação tão consolidada como a legislação do sistema convencional. Tem-se alguns marcos regulatórios importantes como a Resolução Normativa 482 da ANEEL [4] que diz respeito às condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, o PROINFA-Programa de Incentivo às Fontes Alternativas, Resolução Normativa 414 [5], que se refere a aferição de medidor: verificação realizada pela distribuidora, na unidade consumidora ou em laboratório, dos valores indicados por um medidor e sua conformidade com as condições de operação estabelecidas na legislação metrológica

Neste artigo, será realizado o estudo da capacidade de hospedagem da UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. Tratou-se apenas de energia fotovoltaica [6] como GD na UNIFEI.

II. CAMPUS EM ESTUDO

A Universidade em questão, Universidade Federal de Itajubá campus Itajubá, possui em sua infraestrutura dois conjuntos de painéis fotovoltaicos voltados ao abastecimento de suas instalações, bem como para a pesquisa. Além de seus 27kWp instalada – em expansão, sobre o teto do prédio destinado a pesquisa, a UNIFEI também dispõe de uma geração remota voltada a pesquisa de aproximadamente 3kWp.



Fig.1 – Prédio do Campus em Estudo com geração fotovoltaica

Além de garantir a estrutura já existente para futuros estudos, recursos obtidos junto ao Instituto Nacional de Energia Elétrica – INERGE, o campus foi escolhido por dispor de diversos sensores que aferem em tempo real todos os dados necessários de pesquisas, sendo acessível a um terminal supervisor através de [7]. Além dessa acessibilidade, a UNIFEI já conta com um acervo de dados graças a tese desenvolvida em [8].

III. METODOLOGIA

Muitos fenômenos estão associados a inserção de fontes renováveis no sistema, seja variações de tensão de curta ou longa duração, flutuações de tensão, harmônicos, modificação na potência de curto-circuito em cada barra, impactos na rede de proteção (uma vez que atualmente a rede não é bidirecional) além de mudanças nas perdas elétricas. Para estudar e calcular a capacidade de hospedagem de um sistema, segundo Bollen [9], faz-se necessária a escolha de um dos fenômenos citados anteriormente. No desenvolver deste projeto escolheu-se inicialmente o fenômeno da sobretensão, uma vez que ao inserir potência ativa na rede a tensão aumenta proporcionalmente a potência inserida [10].

Em situações onde a carga instalada próxima ao GD fotovoltaico é pesada, este passa a atuar como regulador de tensão, uma vez que a queda de tensão é atenuada pela proximidade da geração e da carga [11].

Escolhido o fenômeno a se estudar, procura-se os limites adequados para uma correta operação de sistema com qualidade e confiabilidade. Neste caso, os limites observados pela norma [12] para consumidores de 1 [kV] a 69 [kV] são:

- 0,93 a 1,05 para tensão ser considerada adequada;
- 0,90 a 0,93 para tensão ser considerada precária;
- <0,90 ou 1,05 para tensão ser considerada crítica.

Sabendo-se do limite de sobretensão, das condições de carga e geração, faz-se o estudo de fluxo de potência para determinar as tensões em cada barra e verificar se a potência injetada na rede pela geração distribuída resulta em valores aceitáveis de sobretensão, obtendo-se também a margem de sobretensão. Fazendo-se novos experimentos a fim de diminuir essa margem de sobretensão, acha-se a capacidade de hospedagem máxima possível. No caso em questão, o objeto de estudo é o alimentador nº2 da rede de distribuição do Campus Universitário da Universidade Federal de Itajubá.

A. Métodos determinísticos

Inicialmente, fora proposto a utilização do método determinístico para obtenção da capacidade de hospedagem, levando em conta dados ou estimativas obtidas de diferentes medidores distribuídos pelo campus UNIFEI – sede Itajubá.

Este método propõe que o cálculo seja realizado através do pior cenário possível, ou seja máxima geração e mínimo consumo, para tanto necessita-se determinar os parâmetros de geração e carga.

B. Determinação das cargas

Para determinação das cargas, utilizou-se das séries históricas disponíveis no período de um ano (2015) para

algumas cargas (EXCEN, BIOMAT, INCIT e o prédio com painéis fotovoltaicos) e propôs uma estimativa para valores não medidos (CEDUC e HANGAR) levando também em consideração a área da vista de cima e taxas de ocupação de prédios semelhantes. Como neste caso visa-se a condição de cargas mínimas, fez-se para as séries históricas o perfil de demanda mínimo considerando que em 95% do tempo o valor fica igual ou acima do valor do perfil.

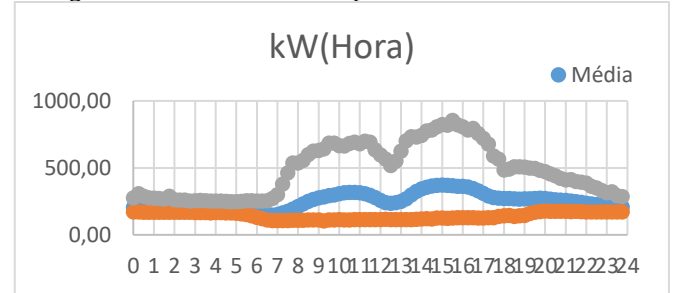


Fig. 2 - Medição da entrada de Energia Elétrica da UNIFEI - Ponto CEMIG.

Para a modelagem dos cabos, transformadores e rede externa da utilizou-se do unifilar dos prédios da UNIFEI, bem como o valor encontrado no estudo de capacidade de hospedagem encontrado em [2]. No anexo, na figura 3, se encontra o unifilar do segundo alimentador da universidade.

C. Determinação da geração

Visto que o objetivo do trabalho é determinar o valor máximo de geração para alterar as propriedades do sistema, o limite de geração fica sujeito apenas aos valores inseridos na simulação. Porém, para se ter uma noção das limitações físicas e áreas do telhado, utilizou-se como parâmetro inicial a área disponível de cada teto, como mostra a tabela 1, e fez-se uma proporcionalidade com a área atualmente instalada.

Tabela 1: Área disponível no telhado de cada prédio.

Prédios	Área [M ²]	Potencial em [KWp]
CEDUC	847	35,1
HANGAR	681	28,152
Prédio com PV	653	27 (já instalado)
INCIT	727	30,08
BIOMATERIAIS	623	25,76
EXCEN	759	31,37

Sabendo que o horário que apresenta maior geração é ao meio dia e também levando em conta que a carga neste horário é a mínima encontrou-se, portanto, o cenário crítico necessário ao estudo que pode ser observado na figura 2. Sabendo também que a geração máxima instalada foi de aproximadamente 27kW, pode-se estimar a geração em cada prédio.

IV. FLUXO DE POTÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO MATEMÁTICA

Uma das principais ferramentas para o estudo de sistemas elétricos de potência é o cálculo do fluxo de potência, o qual discrimina os valores de tensão, potência ativa e reativa injetada ou absorvida em cada ponto do sistema. Como em uma GD a característica do fluxo é bidirecional existem alguns aspectos negativos como aumento da variação de tensão no ponto de conexão onde o gerador fotovoltaico está instalado. Conforme visto em [9], para um único gerador distribuído a capacidade de hospedagem pode ser calculada através da seguinte fórmula aproximada:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P_{ger}}{U^2} \quad (1)$$

Onde R é a resistência equivalente da fonte, P_{ger} a potência gerada pela geração distribuída e U a tensão nominal. Sendo uma boa primeira estimativa para o cálculo e caracterizando inicialmente o problema de sobretensão na geração distribuída, onde a resistência frente a reatância não é desprezível.

O presente trabalho trabalha com o fluxo de potência implementado pelo MATLAB para o cálculo de uma ou mais fontes distribuídas através de cálculos numéricos iterativos.

Segundo [13] deve-se também ser realizada uma análise prévia para avaliação se as novas configurações continuam adequadas para atender os novos requisitos do fluxo de potência. Há estudos que apontam que seria possível aprimorar os índices de qualidade, pois poderia ocorrer uma diminuição do nível de desequilíbrio de tensão entre fases [13].

No caso em estudo utilizou-se as cargas como sendo barras PQ, opção esta que também foi expandida no caso das barras contendo geração distribuída, uma vez que sabemos os valores de potência ativa e reativa para a consideração de máxima geração e mínima carga, fazendo com que o fluxo calcule as tensões, fase e ângulo, de cada um dos pontos. Considerou-se também que os inversores só injetam potência ativa, a fim de não causar outros problemas de fator de potência e poder ser comercializada com a rede.

A. Escolha do software

Optou-se pelo software *MATLAB / Simspace* para a realização do cálculo do fluxo de potência. Este software ajuda a desenvolver sistemas variados de controle e testá-los de forma personalizada e eficiente, podendo os blocos, bibliotecas, domínios serem criados através de outros blocos ou em script pela linguagem de MATLAB. Dentro desta ferramenta do Simspace, existe uma área voltada aos estudos dos sistemas elétricos de potência, SimPowerSystem, que foi utilizada no presente estudo e que possui ferramentas já prontas para a efetuação do cálculo do fluxo de potência inclusive em sistemas desbalanceados.

B. Determinação de cenários para o fluxo de potência

Primeiramente, para se estudar o sistema de distribuição contendo geração distribuída, foi escolhido o prédio que já apresenta painéis fotovoltaicos que geram e fornecem energia para a universidade. A partir da escolha anterior, foram simuladas inúmeras vezes o fluxo de carga a fim de aumentar a geração no ponto em questão ao máximo, garantindo níveis seguros de sobretensão mencionados anteriormente (1.05 pu). A partir do valor inferido nas simulações do caso anterior, fez-se novas tentativas contendo duas gerações distribuídas, utilizando-se a mesma potência total injetada do valor aferido no prédio com geração, porém metade em cada ponto, fazendo mesmo procedimento porém com três, quatro, cinco e seis gerações.

Assim, no presente trabalho será apresentado 12 cenários, sendo divididos em três situações:

- 1) Apenas uma geração distribuída, sendo que esta capaz de gerar o máximo suportado pelo sistema, levando em conta a sobretensão na rede.
- 2) Com duas, três, quatro, cinco, seis gerações distribuídas, tendo como total o mesmo valor máximo encontrado anteriormente.
- 3) Todos os prédios gerando o máximo, havendo duas, três, quatro, cinco, seis e sete gerações distribuídas, dentro dos valores determinados de sobretensão visto em norma.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4, vista no anexo, representa o cenário 1, onde a geração se concentra toda em um único prédio. A simulação do fluxo de potência mostrou que pode ser gerado até 179,982 KW/ fase sem que haja implicação nos níveis permitidos de sobretensão que estão na tabela 2 [12].

Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$

Para o cenário 2 é representado a geração distribuída em múltiplos pontos/prédios, indo de 2 a 6 geradores distribuídos. Para esse caso foi levado em consideração a limitação do caso 1, dividindo-se a geração máxima do prédio que apresenta geração fotovoltaica pela quantidade de geradores distribuídos inseridos no sistema, conforme visto na tabela abaixo:

Tabela 3 - Número de geradores distribuídos e respectivas potências para o cenário 2

Nº de GD	kW trifásico
1	540
2	270
3	180
4	135
5	108
6	90

Com auxílio da figura 5, vista no anexo, nota-se claramente a atenuação do efeito na sobretensão quando é inserida múltiplos pontos de geração.

Com base nos valores dos relés de proteção, calculou-se os limites da instalação do sistema e posteriormente simulou-se, notando que não houve nenhum problema ao utilizar tais valores e que a influência da sobretensão é baixa frente as limitações físicas do sistema de potência e da área do telhado, conforme exposto na tabela 1.

Para o cenário 3 é representado a geração distribuída em cada prédio. Para esse caso foi encontrado o limite máximo de potência injetada para cada simulação, a fim de não ultrapassar 5% de sobretensão, gerando-se assim a tabela 4.

Tabela 4 - Número de geradores distribuídos e respectivas potências para o cenário 3.

Nº de GD	Potência trifásica em kW	Tensão em PU
1	535	1,049527807
2	1655	1,049947534
3	2705	1,049947534
4	3285	1,050388411
5	3725	1,049758556
6	4260	1,049758556
7	4410	1,049758556

VI. CONCLUSÕES

O estudo da sobretensão em um sistema universitário mostrou-se de pequena influência como limitador da inserção de fontes renováveis do sistema. Também se notou que quanto mais distribuída a geração é no sistema, menores são as chances de provocar uma grande variação nos níveis de tensão do barramento.

Como tratou-se a distribuidora como um barramento infinito, ou seja, uma de tensão seguida de nenhuma impedância, os valores de capacidade de hospedagem ficam exageradamente grandes. Neste exemplo, a escola que possui 5 alimentadores e diversos prédios, poderia ser atendida facilmente apenas com os prédios do alimentador 2.

Este estudo também acarretou na geração de novos questionamentos frente a sistemas de distribuição, levando a questionar problemas futuros relacionados a inserção de muita geração distribuída e a capacidade da distribuidora de consumir em determinados momentos do dia a geração excedente do sistema, ficando a carga de trabalhos futuros esta indagação.

Por fim, neste estudo considerou-se a não inserção de reativo por parte dos inversores, para não afetar fator de potência ou comercialidade da venda de energia a concessionária. Esta consideração pode ser um tanto rígida e acaba limitando ainda mais a capacidade de hospedagem de um local em específico, podendo isto ser mudado modificando a programação do inversor e da inclusão de novas tecnologias para obter um maior controle do sistema. Porém notou-se que embora tenha-se considerado fortes restrições a geração, incluindo o método do pior caso possível, a influência da sobretensão não é tanta quanto outros fatores externos, como a limitação da área de telhado e dos relés de proteção, e pode ser ínfima frente a outros problemas de qualidade. De forma qualitativa, a limitação física gera uma capacidade de hospedagem de aproximadamente 177 kWp, o que corresponderia apenas 4% do valor encontrado em simulação, visto na tabela 4. Assim, fica também para trabalhos futuros o estudo da inserção de harmônicos e desequilíbrios neste sistema.

VII. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio parcial do INERGE, CNPq, CAPES, FAPEMIG e UNIFEI.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministério de Minas de Energia. Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar. Disponível na internet via < http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030> 10 de outubro de 2016.
- [2] OLIVEIRA, Tiago Elias Castelo de. Estudo da Capacidade de Hospedagem de Fontes de Geração Distribuída no Sistema Elétrico de um Campus Universitário. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- [3] MIGUEL, D.; CARVALHO, S. "Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica." Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - MIEEC. Lisboa, Julho de 2011.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Resolução Normativa 482.", 2012.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Resolução Normativa 414.", 2010.
- [6] DUDIACK, I. J. "Integration of renewable energy sources to the power system.", 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Krakow, p. 148–151, 2014.
- [7] Fronius, "Solar.WEB", 2016. Disponível em: <https://www.solarweb.com/PvSystems/Widgets>. Acesso em: 16 de fev. 2016.
- [8] Campos, B.P., "INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA O MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA DE UMA SMART MICROGRID", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2016
- [9] BOLLEN, M.; HASSAN, F. Integration of Distributed Generation in the Power System, in: IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Blackwell, New York, p. 6–83, 2011.
- [10] SOLANKI, S. K.; RAMACHANDRAN, V.; SOLANKI, J. "Steady state analysis of high penetration PV on utility distribution feeder." PES T&D 2012, p. 1–6, 2012.
- [11] SHAYANI, R. A. "Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição." Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Energia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 1 – Introdução.", 2015.
- [13] ESSLINGER, P.; WITZMANN, R. "Increasing grid transmission capacity and power quality by a new solar inverter concept and inbuilt data communication." IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe, p. 1–7, 2010.

IX. ANEXOS

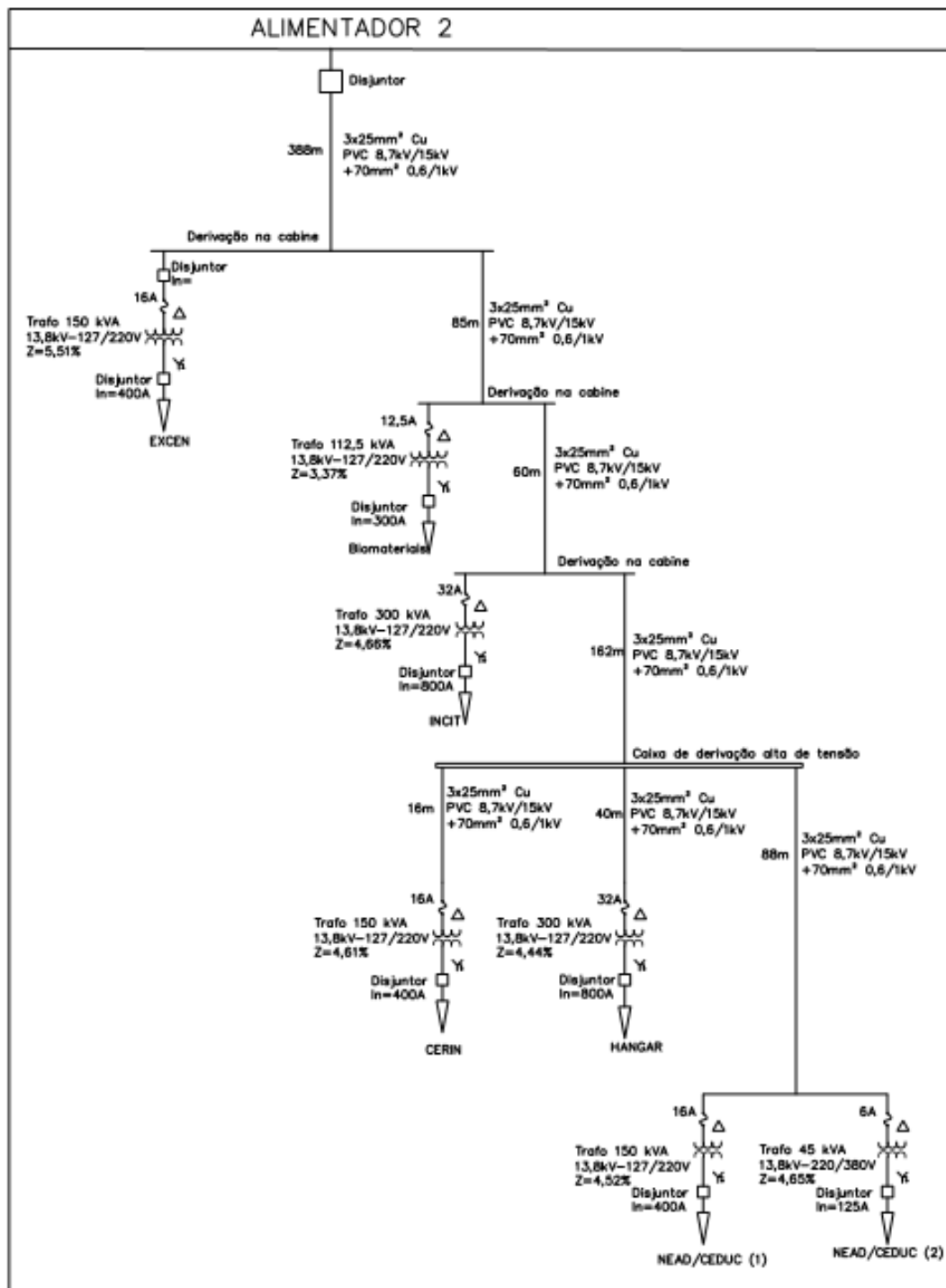


Fig. 3 – Unifilar do segundo alimentador da universidade em estudo

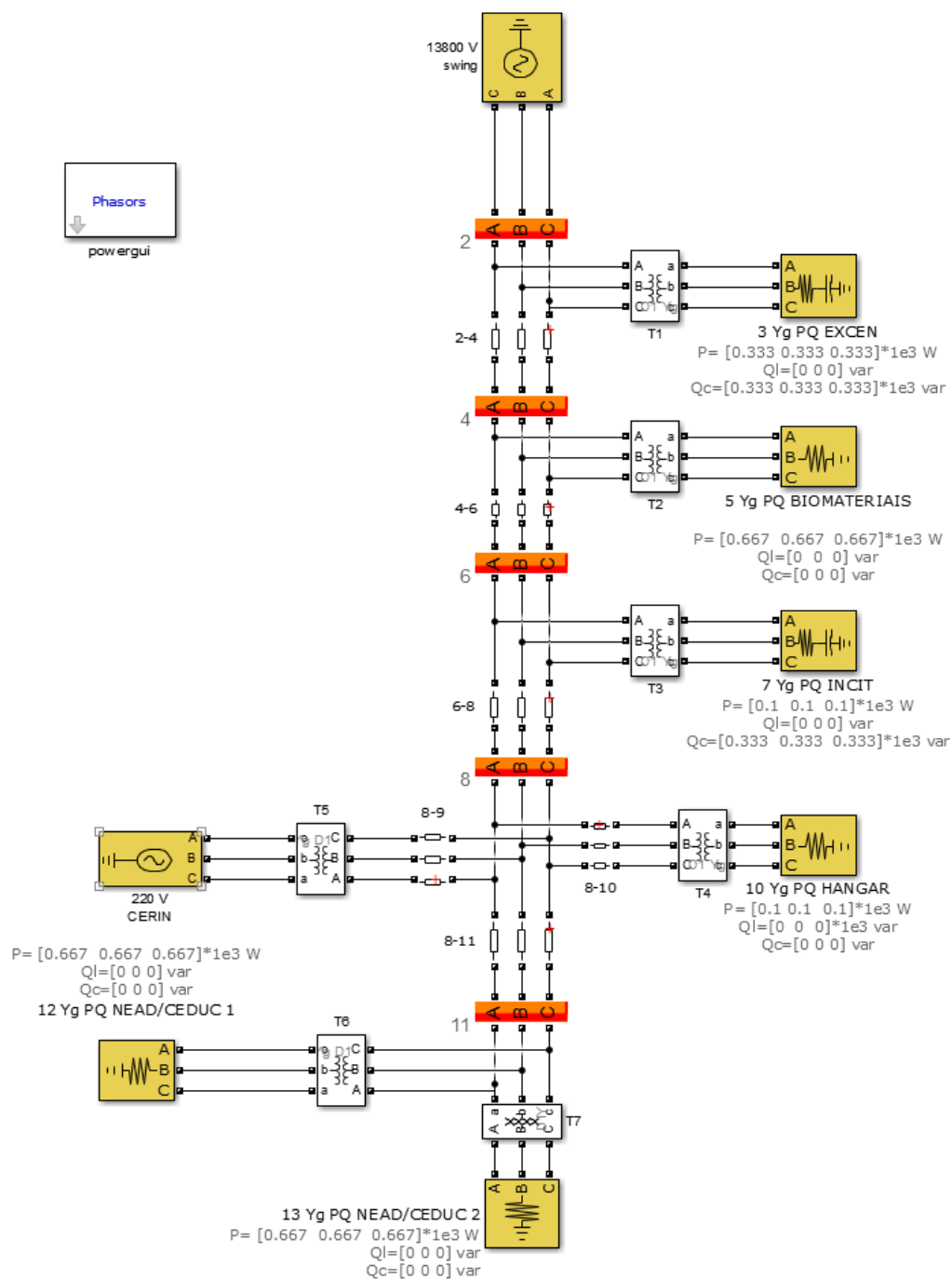


Fig. 4 – Sistema com apenas uma geração distribuída.

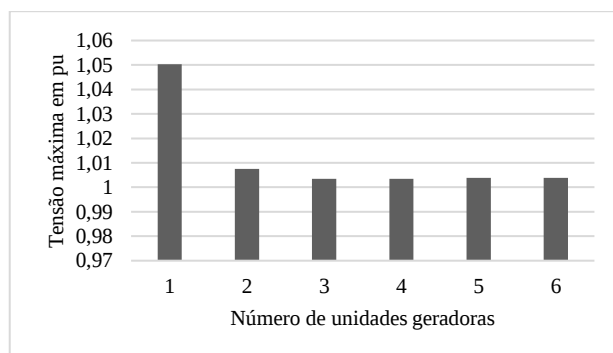


Fig. 5 - Influência do número de geradores sob a tensão nos barramentos de um sistema