

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO**

**MARCUS VINICIUS DOS REIS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COMPONENTES  
DE POTÊNCIA EM REPRESENTAÇÃO MONOFÁSICA DE  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

**SÃO CARLOS  
2016**



**MARCUS VINICIUS DOS REIS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COMPONENTES  
DE POTÊNCIA EM REPRESENTAÇÃO MONOFÁSICA DE  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

**SÃO CARLOS  
2016**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D375a dos Reis, Marcus Vinicius  
Análise do Comportamento de Componentes de Potência  
em Representação Monofásica de Sistema de Distribuição  
com Geração Distribuída / Marcus Vinicius dos Reis;  
orientador Ricardo Quadros Machado. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2016.

1. geração distribuída. 2. sistema de distribuição.  
3. potência média. 4. potência oscilante. 5. parâmetros  
de linha. 6. parâmetros de geração. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Marcus Vinicius dos Reis

Título: "Análise do comportamento do fluxo de potência em sistema de distribuição com geração distribuída mediante variações de parâmetros de geração e de linha"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 25/11/2016,

com NOTA 8,5 (oit), 8,46), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado - Orientador - SEL/EESC/USP*

*Mestre Elian João Agnoletto - Doutorando - SEL/EESC/USP*

*Mestre Rodolpho Vilela Aves Neves - Doutorando-SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

*“Dedico este trabalho à minha esposa,  
mãe e irmão... minha família”*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por nunca desistir de mim.

Em especial, à minha mãe Nadir, pela fortaleza e inúmeras noites rezando por mim; ao meu irmão Felipe, por fornecer meu modelo de caráter nesta vida; e ao meu pai João Luis, o qual espero que esteja orgulhoso de mim. Aos meus avós, tios e primos por me mostrarem que quando um nós ganha, todos ganhamos juntos.

À todos os meus amigos, os de infância Leonardo, Rafael, Victor, Guilherme, Eduardo, Marcio, Almir e Celso; os de longa jornada na SSVP Botega, Tom, Wada, Guilherme N., Guilherme V., Cristiano, Amanda, Ricardo C., Ricardo R., Ana, Andreia, Talita, Leticia, João, Margareth, Mário, Pe. Edson e Emerson; e aos de jornada acadêmica Meigarom, Rachid, Bonato, Murilo, Matheus, Douglas, Fabiano, Fernando e Maurício. Muito obrigado pelo companheirismo, conselhos e pelas amizades sinceras.

Agradeço à todos os funcionários da Universidade de São Paulo pela contribuição em meu aprendizado e crescimento, em especial ao Prof. Ricardo Machado pelo auxílio neste trabalho de conclusão.

E, finalmente, gostaria de agradecer àquela que conheci no início dessa jornada universitária, e que desde então tem se mantido ao meu lado, sonhando cada um de nossos passos juntos, primeiramente como amiga, depois como namorada, noiva e hoje esposa, mas que nunca deixou de ser nenhuma dessas pessoas. Muito obrigado Viviane, meu grande amor.

*“We are all visitors to this time, this place. We are just passing through. Our purpose here is to observe, to learn, to grow, to love... and then we return home.”*

(Provérbio Aborigene)



## RESUMO

DOS REIS, M. V. *Análise do Comportamento de Componentes de Potência em Representação Monofásica de Sistema de Distribuição com Geração Distribuída*. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

O desenvolvimento da geração distribuída nos últimos anos em diversos países tem sido notório devido a fatores como crescimento da demanda de energia elétrica, incentivos a tecnologias sustentáveis, bem como a diversificação da matriz energética. Todavia, a conexão de geradores distribuídos no sistema de distribuição modifica o modo de operação, controle e proteção do sistema e impacta em fatores como qualidade de energia, regulação de tensão e natureza do fluxo de potência no sistema. Tais impactos podem ser considerados positivos ou negativos e relacionam-se com fatores tais como nível de potência fornecida e alocação do gerador distribuído no sistema. Neste contexto, este trabalho apresenta uma abordagem monofásica de investigação da influência da geração distribuída sobre o comportamento das componentes de potência em um sistema de distribuição de escala experimental. Esta investigação foi conduzida por meio de variações de parâmetros de linha e de geração, além da abrangência de diferentes níveis de distorções harmônicas, os quais caracterizam algumas das influências proporcionadas pela conexão dos geradores distribuídos em sistemas de distribuição. Pretende-se com esta análise verificar as contribuições específicas que variações desta natureza acarretam sobre o fluxo de potência médio e o fluxo de potência oscilante em sistemas com as características mencionadas. Por meio desta abordagem, foi possível observar que, ao contrário do que ocorre com os parâmetros de geração, o aumento dos parâmetros de linha propiciam o aumento da potência média transportada no sistema, ao passo que os parâmetros de geração atuam na redução da potência média. Além disso, verificou-se que diferentes perturbações harmônicas provenientes dos dois geradores apresentam efeitos específicos sobre a potência média e oscilante do sistema.

**Palavras-chave:** geração distribuída, sistema de distribuição, potência média, potência oscilante, parâmetros de linha, parâmetros de geração



## ABSTRACT

DOS REIS, M. V. *Analysis of the Behaviour of Power Components in Single-Phase Representation of Distribution Power Systems with Distributed Generation*. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

The development of the distributed generation in recent years in several countries has been notorious due to elements such as growing of the power electric demand, incentive on generation technologies which enable the use of renewable sources as well as the diversification of the energy sources. However, the connection of distributed generators to the network system modifies system's operation, control and protection mode and impacts on power quality, voltage regulation and power flow behaviour. Such impacts might be considered positive or negative and they are related to factors such as power level provided and placement of the distributed generator. In this context, this work presents a single-phase approach for the investigation of the influences of distributed generation over the behaviour of power components in a experimental scale distribution system. This research was conducted by providing variations on line and generation parameters besides including different levels of harmonic distortion, which characterize some impacts of the distributed generation on distribution systems. It is intended in this analysis verifying the specific contributions that such variations cause on medium and oscillating power flow in systems with characteristics as mentioned. Through this approach, it was noticed that, unlike what happened to the generation parameters, the increase of line parameters provides an improvement of system's medium power, whereas generation parameters act on the reduction of the medium power. Moreover, it was observed that different harmonics disturbances from both generators present specific effects over the medium and oscillating power of the system.

**Keywords:** distributed generation, distribution system, medium power flow, oscillating power flow, line parameters, generation parameters



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição com Geração Distribuída.....	30
Figura 2: Representação de rotina de simulação para validação do modelo.....	35
Figura 3: Validação do modelo algébrico para os parâmetros de potência e corrente instantânea. ....	36
Figura 4: Validação do modelo algébrico para os valores de tensão dos geradores convencional e distribuído.....	36
Figura 5: Variação do fluxo de potência médio dada variação de parâmetros de linha....	39
Figura 6: Variação do fluxo de potência médio dada variação de parâmetros de geração. .....	45
Figura 7: Variação da potência oscilante com interferência de harmônicas. ....	49
Figura 8: Detalhe do transitório da potência oscilante. ....	49
Figura 9: Detalhe do regime permanente da potência oscilante.....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos parâmetros nominais do sistema de distribuição. ....	30
Tabela 2: Variação da potência média mediante variação de parâmetros de linha. ....	40
Tabela 3: Valores de tensões e corrente eficaz para os diferentes índices de harmônicos. .....	41
Tabela 4 Variação da potência média mediante variação de parâmetros de geração.....	46





## SUMÁRIO

<b>Resumo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de ilustrações .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>19</b>
Objetivo .....	21
Organização do Documento .....	21
<b>Capítulo 2 – Revisão da Literatura.....</b>	<b>23</b>
2.1. PERFIL DE TENSÃO .....	23
2.2. NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO .....	25
2.3. PERDAS .....	26
2.4. FLUXO DE POTÊNCIA .....	27
<b>Capítulo 3 – Descrição do Sistema, Modelagem e Validação.....</b>	<b>29</b>
3.1. SISTEMA ELÉTRICO.....	29
3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	31
3.3. VALIDAÇÃO .....	34
<b>Capítulo 4 – Análise das Componentes da Potência .....</b>	<b>37</b>
4.1. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE LINHA.....	38
4.2. RESULTADOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE LINHA .....	40
4.3. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO.....	44
4.4. RESULTADOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO .....	45
4.5. ANÁLISE DA POTÊNCIA OSCILANTE .....	48
4.6. RESULTADOS DA POTÊNCIA OSCILANTE.....	50
<b>Capítulo 5 - Conclusões.....</b>	<b>53</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>55</b>



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Tem-se observado nas últimas décadas uma significativa tendência da disseminação do conceito de geração distribuída nos sistemas de distribuição, conceito este definido por compreender unidades de geração de energia elétrica de média e baixa potência conectadas diretamente ao sistema de distribuição (SEVERINO et al., 2008). Este fenômeno tem proporcionado novas condições de operação do sistema elétrico como um todo, tais como desverticalização do setor energético e livre concorrência entre concessionárias e produtores independentes (RICCIARDI et al., 2012). Fatores como crescimento da demanda de energia elétrica, desenvolvimento tecnológico de novas fontes de geração de energia, incentivo de políticas ambientais para proliferação de fontes sustentáveis, bem como estímulos para financiamentos de empreendimentos e regulamentação do comércio de energia, têm contribuído para a crescente integração de fontes distribuídas de energia ao sistema elétrico (SARABIA, 2011).

Os fatores relacionados ao crescente interesse na geração distribuída estão fortemente relacionados aos benefícios que esta tecnologia de geração pode proporcionar para as concessionárias e consumidores finais (TREVISAN, 2011). Economicamente, a geração distribuída se faz vantajosa por apresentar baixo custo de investimento para construção de unidades de geração, baixo custo relacionado à operação e manutenção e proporciona uma economia em investimentos na implementação de linhas de transmissão e distribuição de energia, necessária para transportar a energia das grandes usinas aos grandes centros consumidores, contribuindo indiretamente para a redução das perdas elétricas nas linhas. Além disso, na questão operacional do sistema elétrico, o emprego de geradores distribuídos no sistema de distribuição tem contribuído para aumentar o nível de confiabilidade do suprimento de energia, rápida resposta ao crescimento da demanda e auxílio no controle de estabilidade de tensão, devido ao fato do sistema poder suportar uma carga maior (CARVALHO, 2009). Os benefícios da geração distribuída também podem ser observados quando considerado o aspecto ambiental. Pelo fato de representar uma geração independente, geradores distribuídos podem se utilizar de recursos locais, possibilitando assim o emprego de geradores eólicos, fotovoltaicos e bio-geradores, contribuindo assim para um uso mais racional das fontes de energia, complementação da geração hidráulica, redução dos impactos ambientais causados

pelos grandes reservatórios de geração hídrica e redução da emissão de gases de efeito estufa por proporcionar uma diminuição da dependência das usinas térmicas (LUIZ, 2012; SARABIA, 2011).

Por outro lado, a geração distribuída possui características que impactam negativamente a proteção, controle e operação de sistemas elétricos de potência. No que se refere à proteção de sistemas de distribuição, a conexão de geradores distribuídos contribuem para o aumento dos níveis de curto-circuito do sistema e alteração do perfil de tensão. O impacto no controle do sistema elétrico pode ser observado pelo aumento da complexidade na coordenação entre os diferentes meios de geração de energia e a demanda de consumo (EL-KHATTAM, 2004). Além disso, como a conexão dos geradores distribuídos à rede de distribuição é realizada por meio de conversores de potência, há uma contribuição por parte desses dispositivos para a deterioração da qualidade de energia por proporcionar distorções harmônicas, flutuações e desequilíbrios de tensão. Por fim, do ponto de vista da operação, a injeção de potência promovida pelos geradores independentes pode contribuir com o aumento das perdas no sistema de distribuição, além de impactar nas características do fluxo de potência do sistema, tais como direção, potência ativa, reativa e oscilante (LEONARDO, 2014; SARABIA, 2011).

Em geral, sistemas de distribuição foram designados para constituírem uma rede passiva com sentido único de fluxo de potência, recebendo grande quantidade de energia dos sistemas de transmissão e entregando aos consumidores. Com advento da geração distribuída o sistema de distribuição passou a compreender uma característica de natureza ativa, em virtude de conectar na mesma rede geradores e consumidores, ocasionando assim a presença de fluxos de potência bidirecionais (TREVISAN, 2011). A interferência de fluxos de potência contrários ao convencional é percebida por elementos do sistema tais como transformadores, circuitos chaveadores e reguladores e linhas de distribuição, que passam a apresentar diferentes configurações devido às novas características dos fluxos de potência, apresentando assim o sistema como um todo uma nova configuração (STRBAC, 2007). Sabendo-se que o fluxo de potência é composto por uma parcela que produz trabalho e uma outra que não, sendo definidas como parcela média, ou ativa, e a parcela oscilante, é de se esperar portanto que diferentes configurações de sistema propostas pelas conexões de geradores distribuídos resultem diferentes efeitos sobre a parcela média e a oscilante do fluxo de potência (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007; MORALES, 2011).

Neste contexto, verifica-se que o fluxo de potência em um sistema de distribuição apresenta relativa influência em vários elementos da operação, controle e proteção do sistema, além de possuir componentes com comportamentos diferentes frente as variações sofridas pelos sistemas de distribuição com a inserção da geração distribuída. Surge assim, a necessidade de investigar a influência da conexão de geradores distribuídos no sistema de distribuição, mais especificamente investigar o comportamento do fluxo de potência em sistema de distribuição frente às diferentes configurações e alterações que a conexão de geradores distribuídos proporcionam.

## **Objetivo**

Este trabalho tem por objetivo modelar um sistema de distribuição monofásico experimental abrangendo geração distribuída e suas respectivas distorções harmônicas, de tal forma que possibilite analisar qualitativamente as componentes do fluxo de potência do sistema, dada a variação dos parâmetros de geração e de linha. A análise da potência será desmembrada em uma parcela média e outra oscilante, a fim de investigar especificamente a influência dos parâmetros de geração e distribuição em cada uma dessas parcelas. Pretende-se com isso determinar a influência separadamente dos parâmetros de geração e de linha no comportamento do fluxo de potência do sistema.

## **Organização do Documento**

O capítulo 1 constitui os elementos introdutórios e aborda a definição e contexto geral de geração distribuída, além de definir os objetivos que permeiam este trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos diferentes impactos que a geração distribuição causa sobre os sistemas de distribuição.

No capítulo 3 o sistema elétrico em questão é descrito, bem como o raciocínio para determinação do modelo algébrico e posterior validação por meio de ferramenta computacional de simulação.

O capítulo 4 por sua vez contém análises do comportamento do fluxo de potência do sistema mediante à variações dos parâmetros de linha e de geração bem como os resultados e discussões pertinentes.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e as considerações finais deste trabalho.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

A inserção de geradores distribuídos em sistemas originalmente radiais, configuração esta da maioria dos sistemas de distribuição, e designados para operarem sem qualquer tipo de geração, pode impactar significativamente na proteção, controle e operação de sistemas de energia (SARABIA, 2011).

Esta inserção pode representar impactos positivos ou negativos, dependendo das características do gerador distribuído e das características de operação do sistema de distribuição (BARKER; MELLO, 2000). Esta duplicidade de efeitos também foi observada por Medeiros, Filho e Oliveira (2012) os quais dentro da análise de diferentes fontes de energia alternativa, afirma que do ponto de vista da rede de distribuição, a conexão de geradores distribuídos pode contribuir ou prejudicar a estabilidade de tensão, níveis de fluxo de potência nas linhas e transformadores e a qualidade de energia fornecida pelas concessionárias. Por exemplo, enquanto por um lado, a injeção de potência pode auxiliar o ajuste do perfil de tensão e estabilidade do sistema, por um outro lado, pode causar sobre-tensões, afundamentos temporários de tensão, flutuações do fator de potência, distorções harmônicas, elevação dos custo de geração, e no caso de geradores monofásicos, desbalanço da tensão da rede.

Neste sentido, é apresentada uma visão geral dos principais aspectos negativos que a geração distribuída acarreta sobre os sistemas de distribuição.

### 2.1. PERFIL DE TENSÃO

Comumente o controle do perfil de tensão em sistemas de distribuição emprega a ação conjunta de chaveamento de *tap* de transformadores, capacitores *shunt* e dispositivo eletrônicos reguladores implementados ao longo do alimentador (COSTA, 2014). A presença de geradores distribuídos neste sistema resulta em mudanças no perfil de tensão nas linhas de distribuição devido a magnitude e direção dos fluxos de potência ativos e reativos inseridos pelos autoprodutores (SARABIA, 2011).

Esta interferência de geradores distribuídos no perfil de tensão de redes de distribuição foi evidenciada por Rossi (2007) e Carvalho (2009) que mostraram que, para um sistema de distribuição com carga máxima, possuindo um gerador distribuído configurado para controlar a tensão terminal e injetando níveis de potência significativamente menores que o demandado, o gerador distribuído proporcionou melhora no perfil de tensão em todas as barras. À medida que a potência injetada aumenta esta melhora deixa de ser perceptível em algumas barras do sistema, ao ponto que, quando a potência injetada se equivale à potência demandada, observa-se o surgimento de perdas em alguns trechos devido a presença de fluxo de potência reverso. Para esta a configuração de sistema com carga leve, as regiões de baixas injeções de potência do gerador merecem atenção especial, pois estando já as barras próximas ao nível de tensão estipulado, o gerador acaba absorvendo potência reativa da rede em excesso, podendo levar o fator de potência a níveis abaixo do permitido. Implementando o controle de fator de potência no gerador distribuído, o perfil de tensão apresenta melhoras para o carregamento máximo, exceto para injeções próximas ao nível demandado em algumas barras. No entanto, para o caso de cargas leves este tipo de controle prejudica o funcionamento do sistema por apresentar elevação da tensão na maior parte do sistema acima dos valores permitidos.

Com base nos diversos estudos que tangem a implementação de geração distribuída em sistema de distribuição verifica-se que o impacto no perfil de tensão é mais acentuado no ponto de conexão. Nesta óptica, Paludo (2014) destaca a importância de um monitoramento eficiente do valor de tensão no ponto de acoplamento, a fim de evitar que os valores ultrapassem os limites estipulados quando houver o fornecimento de potência pela geração distribuída, pois como constatado em estudo com geradores fotovoltaicos com uma relação de 50% entre a geração e a carga instalada os valores de tensão atingiram níveis elevados inaceitáveis, impossibilitando regulação automática do controle de tensão.

Além do mais, não somente elevações de tensão são fenômenos de sistemas com geração distribuída. Os afundamentos de tensão são eventos recorrentes em sistemas de distribuição com geração distribuída, pois espera-se que a atuação do gerador distribuído compense a queda tensão dos consumidores afastados da subestação, e caso este venha a não funcionar, corretamente outros controles de tensão devem preservar os níveis de tensão da região (SILVA, 2007).



## 2.2. NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO

Entre os efeitos que a conexão de geradores distribuídos causa à rede de distribuição pode-se citar o aumento dos níveis de curto-circuito da rede elétrica (EL-KHATTAM, 2004).

Através dos estudos conduzidos por Uqaili et al. (2014) em um sistema de distribuição com mais de 30 barras, verifica-se que, dependendo da magnitude e localização da fonte inserida, alterações são caracterizadas nas correntes de curto-circuito, na estabilidade e performance. Em algumas regiões do sistema, as alterações de operação dos dispositivos de proteção foram tantas que detectou-se a necessidade de ajustes nos relés após a inserção de geradores distribuídos. Strbac, Ramsay e Pudjianto (2007) afirmam que a inserção de geradores distribuídos altera as correntes de curto-circuito no sistema. Se esta situação for mantida por um determinado tempo causará a deterioração dos elementos de proteção do sistema, não sendo mais possível garantir a proteção do sistema. Logo, sugere-se que para cada nova inserção de gerador distribuído uma análise investigativa seja levada em consideração para minimizar o risco das correntes de curto-circuito adicionais não mapeadas para a proteção do sistema.

Na mesma linha de pesquisa, Rossi (2007) simulou um sistema de distribuição real por meio do software DIgSILENT, constatando que a introdução de curtos-circuitos fracos provoca o aumento das correntes de curto-circuito quando comparado o caso do sistema sem o gerador, sendo comprovado que estes índices são diferentes para geradores síncronos e geradores de indução.

Luiz (2012) deixa evidente a complexidade em controlar os dispositivos de proteção em sistemas com geração distribuída. Seu trabalho propõe uma estratégia de proteção para diferenciar o que representa a parcela de corrente de contribuição de geração; e o que representa a corrente de curto-circuito em um acoplamento compartilhado com vários geradores, uma vez que, em certas circunstâncias, estas correntes podem apresentar a mesma ordem de grandeza. Soluções para este caso seriam alterar a configuração do sistema de proteção e implementar proteções de sobrecorrente na saída de cada gerador alternativo, ou mesmo implementar o recente conceito de proteção adaptativa, altamente recomendado para sistemas com alta possibilidade de mudanças. Sua conclusão abrange a necessidade de adequação das linhas de distribuição quanto ao limite térmico, capacidade de interrupção dos disjuntores, dimensionamento de TC's quanto à saturação e estudos de estabilidade dinâmica, sendo todos

esses fatores atribuídos às alterações que as correntes de curto-circuito sofrem com a presença de geradores distribuídos no sistema de distribuição.

## **2.3. PERDAS**

Em linhas gerais, o aumento das perdas de potência em um sistema de distribuição esta relacionada com a quantidade de potência fornecida pelos autoprodutores, bem com o nível de penetração, tecnologia do gerador distribuído e configuração da rede (SARABIA, 2011). Considerando a configuração do sistema elétrico nacional, perdas desta natureza representam 17% do consume doméstico total, em sua maioria atribuídas às longas distâncias entre os grupos geradores e os centros consumidores (AYRES, 2010).

Segundo Marques (2006) o fator econômico tem representado um grande incentivo para pesquisas dos impactos de geradores distribuídos com relação às perdas em sistemas de distribuição. Neste sentido, esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa que busca otimizar alocação de geradores distribuídos em uma rede de distribuição, tendo como requisito minimizar as perdas técnicas no sistema. Deste experimento foi observado que existem determinadas localizações que proporcionam maiores níveis de redução de perdas, como é o caso dos geradores distribuídos acoplados em pontos distantes dos alimentadores principais. Outra observação importante é que nas barras próximas às subestações a injeção de potência pelos geradores distribuídos apresentam efeito desprezível na redução das perdas. Leonardo (2014) também reafirma em suas pesquisas a influência do apelo econômico para com as concessionárias quando se trata estudo das perdas em sistemas de distribuição. Tomando este cenário como base, realiza a comparação de dois métodos de alocação de perdas, sendo eles: Método da Substituição e Método do Coeficiente Marginal de Perdas, para um sistema de distribuição em diferentes pontos de operação com geradores distribuídos. Deste experimento concluiu-se que, para ambos os métodos, as perdas elétricas do sistema estão diretamente associadas à intensidade e distribuição do fluxo de potência no sistema, o qual também é influenciado pela conexão de geradores distribuídos, consequentemente modificando o comportamento das perdas. Desta forma, a geração distribuída contribui para a redução das perdas quando atua no alívio do carregamento, por outro lado, aumenta as perdas quando contribui para a elevação do carregamento.

## 2.4. FLUXO DE POTÊNCIA

A modificação da natureza do fluxo de potência em sistemas de distribuição com geração distribuída é responsável por afetar vários parâmetros e requisitos do controle, operação e proteção dos sistemas elétricos com esta configuração. Ayres, (2010) mostra que o comportamento bidirecional do fluxo de potência produz uma elevação de tensão no ponto de acoplamento, afetando assim o perfil de tensão do sistema. Esta elevação de tensão por sua vez se relaciona com índices de qualidade de energia e níveis de segurança do sistema. Outrossim, muitos sistemas de distribuição não empregam estratégias de proteção para fluxos de potência reversos, podendo circular correntes de curto-circuito pelo sistema danificando dispositivos.

No diz respeito à potência ativa, Paludo (2014) mostra um estudo da influência de geradores distribuídos fotovoltaicos na variação da potência do sistema elétrico. Sistemas fotovoltaicos tem auxiliado o suprimento de cargas locais fornecendo potência ativa, reduzindo a demanda de potência da subestação. Em um edifício comercial foi observado a contribuição de 55% da demanda anual consumida no período de dois anos no caso de painéis solares comerciais. Em contra partida, com este tipo de geração, foi verificado que há períodos do dia em que o fornecimento supera o consumo da unidade, gerando assim um fluxo de potência inverso ao fluxo convencional subestação-carga no sistema de distribuição. O fluxo de potência bidirecional acarreta alguns impactos negativos tais como, aumento de tensão no acoplamento de conexão além de extrapolação de limites nominais dos equipamentos elétricos.

O mesmo comportamento é observado por Alnaser e Ochoa (2016), os quais analisaram a contribuição de geradores eólicos para o fornecimento de potência ativa aos sistema de distribuição. Em um longo período do ano, quando as correntes de ar se tornam mais propícias para este tipo de geração, a potência injetada na rede é suficiente para suprir as cargas locais. No entanto, foi observado situações em que a quantidade de energia fornecida superou a consumida, ocasionando assim depreciações nos níveis de tensão e requisitos de qualidade de energia além de ter contribuído significativamente para o aumento das perdas técnicas no sistema.

Há de se considerar também a parcela do fluxo de potência que não produz trabalho, a potência reativa. Em sistemas de distribuição, esta parcela ao contrário da potência ativa, apresenta comportamento oscilante com o dobro da frequência do sistema e é responsável pelo fornecimento dos campos eletromagnéticos para o funcionamento de cargas indutivas (LEVIN, 2015). Por apresentar esta característica, o fornecimento da potência reativa, ou oscilante, infere sobre o fator de potência do acoplamento, que por consequência afeta o perfil de tensão no

ponto de conexão. Sarabia (2011) apresenta uma análise da variação do fator de potência de geradores distribuídos em sistemas elétricos. Para fatores de potência unitários verifica-se um decréscimo no fator de potência do acoplamento, acompanhado de sobretensão. Já para valores indutivos do fator de potência constatou-se queda da sobretensão em vista do consumo de potência reativa pelo gerador, contribuindo por sua vez com a elevação das perdas.

No intuito de compreender melhor o efeito de cada componente do fluxo de potência, um estudo teórico sobre as características das parcelas média e oscilante do fluxo de potência em sistemas elétricos é conduzido por Akagi, Watanabe e Aredes (2007), os quais baseados na Teoria de Potência  $p-q$ , determinam diferentes estratégias para se compensar as ações das parcela média e da parcela oscilante do fluxo de potência.

Mesmo com o perceptível crescimento das pesquisas que visam investigar o comportamento da potência em sistemas de energia com geração distribuída, Doumbia, Agbossou e Dostie (2006) constatam que ainda são restritas as ferramentas eficazes e robustas para análise de fluxo de potência capazes de abranger diferentes características dos sistemas, como por exemplo com presença de geração distribuída, sistemas trifásicos, radiais, isolados e desbalanceados.

## CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA, MODELAGEM E VALIDAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se a descrição do sistema elétrico adotado como referência, a modelagem matemática do comportamento das parcelas de potência do sistema bem como a rotina de validação do modelo matemático obtido. A ferramenta computacional utilizada nas modelagens matemáticas deste trabalho foi o *software* MAPLE 18.0, software este desenvolvido pela MapleSoft e que se destaca pela alto desempenho de cálculos complexos alinhado com uma interface intuitiva que proporcional desenvolver análises e solucionar problemas matemáticos complexos.

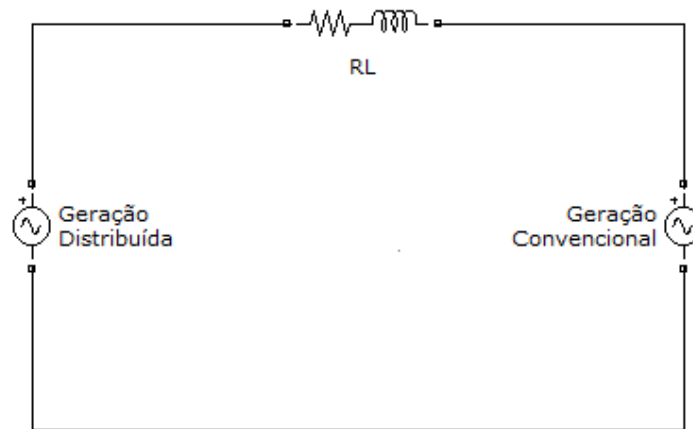
Para validação da modelagem matemática, em conjunto com o MAPLE foi utilizado o *software* MATLAB 7.11.0 da MathWorks. Todos os modelos matemáticos obtidos via MAPLE foram inseridos em uma rotina do MATLAB, a qual implementa uma representação do sistema elétrico no *toolbox* Simulink. Os resultados desta simulação foram comparados com os resultados calculados, garantindo assim a veracidade dos modelados matemáticos.

### 3.1. SISTEMA ELÉTRICO

Este trabalho baseia suas análises em um sistema elétrico de distribuição experimental, passível de implementação em laboratório. Trata-se de um sistema em 60 Hz que emprega duas fontes de tensão senoidais com pico máximo de 90 V. A primeira fonte de tensão representa a geração considerada convencional, a qual fornece a energia elétrica proveniente das linhas de transmissão e das grandes usinas de geração. A outra fonte por sua vez desempenha o papel de um gerador distribuído, representando os geradores fotovoltaicos, eólicos, turbinas à vapor, entre tantos outros meios de geração distribuída possíveis de serem inseridos no sistema de distribuição.

Vale ressaltar que este trabalho é de cunho acadêmico e que visa analisar o comportamento do fluxo e potência no sistema em vista da variação de parâmetros de linha e de geração, além dos impactos provenientes da inserção de harmônicos pelas duas fontes.

Na Fig. 1 é apresentado o diagrama monofásico do sistema em análise.



**Figura 1:** Diagrama unifilar do sistema de distribuição com geração distribuída.

Para fins de análise foram adotados os seguintes valores para os parâmetros que caracterizam a configuração nominal do sistema.

**Tabela 1:** Valores dos parâmetros nominais do sistema de distribuição.

Parâmetros	Representação	Valor
Frequência	$f$	60Hz
Amplitude da componente fundamental da fonte de tensão da Geração Principal	$V_{conv\_fund}$	90V <sub>pico</sub>
Amplitude da componente fundamental da fonte de tensão da Geração Alternativa	$V_{GD\_fund}$	90V <sub>pico</sub>
Ângulo de geração do gerador distribuído	$\beta$	20°
Indutância do sistema de distribuição	$L$	5mH
Resistência do sistema de distribuição	$R$	10mΩ
Amplitude das distorções harmônicas	$V_{harm}$	9V

### 3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Com a modelagem matemática busca-se determinar uma representação abrangente que possa ser empregada indiferentemente da presença ou não de harmônicos. Outro objetivo da modelagem é obter equações que regem o comportamento do sistema em função dos parâmetros conhecidos, sendo frequência ( $f$ ), tensão da fonte convencional ( $V_{conv\_fund}$ ), tensão da fonte alternativa ( $V_{GD\_fund}$ ), ângulo do gerador distribuído ( $\beta$ ), indutância da linha ( $L$ ) e resistência da linha ( $R$ ).

Partindo da representação do sistema de distribuição apresentado na Fig. 1, por meio da análise das tensões em um sistema de malha fechada, determina-se a relação das tensões dos componentes do sistema.

$$R * i_{inst} + L \frac{di_{inst}}{dt} = \sum_m^{\infty} V_{altern[m]} \sin(m\omega t + \beta) - \sum_m^{\infty} V_{conv[k]} \sin(m\omega t) \quad (1)$$

$$m = 1,3,5, \dots$$

Expandindo os termos trigonométricos do lado direito da Eq. 1 obtém-se que

$$\sum_m^{\infty} [V_{altern[m]} (\sin(m\omega t) \cos(\beta) + \cos(m\omega t) \sin(\beta))] - \sum_m^{\infty} V_{conv[m]} \sin(m\omega t), m = 1,3,5, \dots \quad (2)$$

Desta forma, analisando a Eq. 2 verifica-se a possibilidade de representar a equação por meio de uma soma de senos e cossenos, tal qual abaixo:

$$R * i_{inst} + L \frac{di_{inst}}{dt} = \sum_{m,a,b}^{\infty} [K_a * \cos(m\omega t) + K_b * \sin(m\omega t)] \quad (3)$$

$$m = a = 1,3,5, \dots b = 2,4,6, \dots$$

As constantes  $K_a$  e  $K_b$  são obtidas por comparação dos termos comuns que acompanham os senos e cossenos da Eq. (2), e definidas por:

$$\begin{aligned} K_a &= V_{altern[m]} * \sin(\beta), a = m = 1,3,5, \dots \\ K_b &= V_{altern[m]} * \cos(\beta) - V_{conv[m]}, b = 2,4,6, \dots m = 1,3,5, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Dado que a tensão do sistema está representada na forma de soma de senos e cossenos, assume-se que a corrente instantânea do sistema assumirá comportamento semelhante, podendo ser representada conforme Eq. 5, onde o termo  $I_0$  representa a parcela transitória da corrente.

$$i_{inst} = I_0 + \sum_{m,a,b}^{\infty} [I_a * \cos(m\omega t) + I_b * \sin(m\omega t)], m = a = 1,3,5, \dots b = 2,4,6, \dots \quad (5)$$

A fim de determinar os coeficientes da corrente instantânea tanto o estado transitório quanto o regime permanente do sistema são considerados em análise. Analisando o comportamento do sistema no transitório, onde define-se que  $t = 0$ , por meio da Eq. 1 obtém-se que

$$R * i_{inst} + L \frac{di_{inst}}{dt} = 0 \quad (6)$$

Solucionando a Eq. 6 para a variável  $i_{inst}$  avaliada entre o intervalo  $[0 \dots I_0]$

$$I_0 = Y * e^{-\frac{R*t}{L}} \quad (7)$$

Logo, para  $t = 0$ ,  $i_{inst} = 0$ . Avaliando a Eq. 5 nesta configuração de transitório elimina-se os termos senos e obtém-se o valor unitário para os cossenos. Determina-se então o valor da constante de integração do termo transitório da corrente como sendo:



$$Y = - \sum_a^{\infty} I_a, a = 1,3,5, \dots \quad (8)$$

Passando-se então para a análise do regime permanente, por meio da Eq. 1 aplicam-se as definições de corrente obtidas em nas Eq. 5 e Eq. 8 e, por comparação dos termos que acompanham os senos e cossenos, obtém-se que:

$$K_a = m * \omega * I_b + I_a * R, a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots \quad (9)$$

$$K_b = -m * \omega * I_a + I_b * R, a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots$$

Com isso, por meio da Eq. 9 verifica-se a existência de pares de sistemas lineares, os quais possibilitam determinar os valores das variáveis  $I_a$  e  $I_b$ .

$$I_a = - \frac{m * K_b * L - K_a * R}{(m * \omega * L)^2 + R^2}, a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots \quad (10)$$

$$I_b = \frac{m * K_a * L - K_b * R}{(m * \omega * L)^2 + R^2}, a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots$$

Sendo assim, para qualquer configuração do sistema de distribuição com harmônicos, sejam esses inseridos pela geração convencional ou pela geração distribuída, pode-se determinar a potência instantânea do sistema em termos dos parâmetros de geração e de linha, e a partir desta, por meio da Eq. 11.

$$P_{inst} = \sum_m^{\infty} V_{conv[m]} \sin(m\omega t) * \left( I_0 + \sum_{m,a,b}^{\infty} [I_a * \cos(m\omega t) + I_b * \sin(m\omega t)] \right) \quad (11)$$

$$a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots$$

Para um sistema trifásico a três ou quatro condutores, a Teoria de Potência p-q utiliza-se dos conceitos de sequências de corrente trifásica (zero, positiva e negativa) e desequilíbrios entre as correntes para desmembrar a potência instantânea em potência média e potência oscilante. A potência média representa a componente que realiza trabalho, neste caso, a potência ativa. A componente oscilante por sua vez pode ser fracionada entre as componentes reativa, de distorções e de desequilíbrios (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). O conceito empregado na Teoria p-q pode ser expandido para circuitos monofásicos, onde assume-se que não há desequilíbrio e desbalanço entre as correntes. Nesta configuração a potência instantânea pode ser analisada em termos da componente que realiza trabalho (potência média), e da componente que não realiza trabalho (potência oscilante), não sendo possível para este caso distinguir os demais componentes que compõe a componentes oscilante (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

Sendo assim, por meio da Eq. 11 pode-se determinar a componente média e oscilante da potência do sistema por meio das Eq. 12 e Eq. 13, respectivamente.

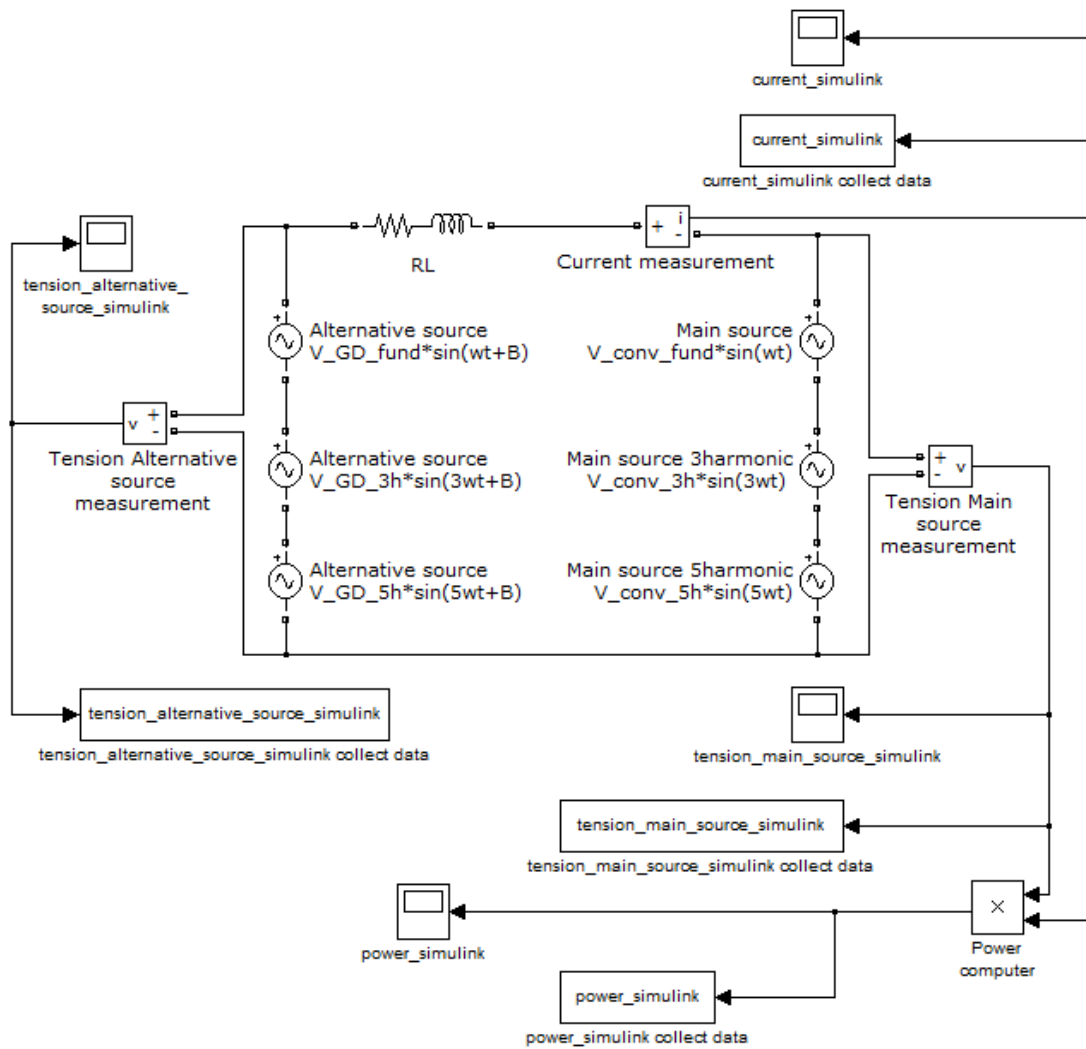
$$P_{med} = \frac{1}{2} \sum_{b,m}^{\infty} V_{conv[m]} * I_b, b = 2,4,6, \dots m = 1,3,5, \dots \quad (12)$$

$$P_{osc} = \sum_{m,a,b}^{\infty} P_{inst} - P_{med}, a = m = 1,3,5 \dots b = 2,4,6, \dots \quad (13)$$

### 3.3. VALIDAÇÃO

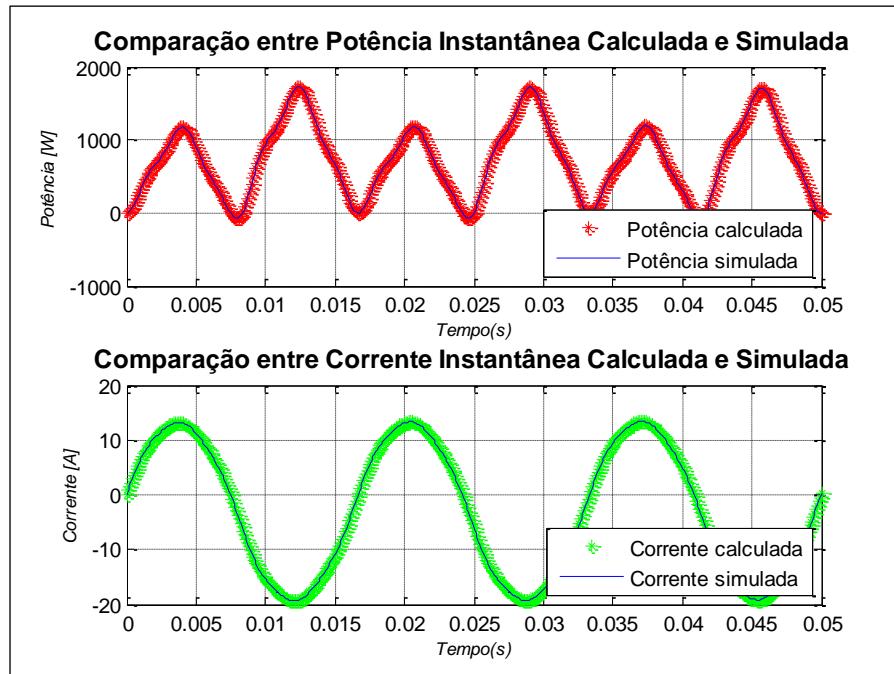
Este procedimento foi adotado com o intuito de garantir que o modelo matemático obtido por meio do equacionamento e análise algébrica correspondesse com a realidade. As relações das tensões e corrente do sistema foram inseridas em uma rotina do MATLAB e comparadas com uma representação simulada por meio do *Simulink*.

A Fig. 2 apresenta a configuração de sistema de distribuição com a inserção de 3° e 5° harmônico por ambos os geradores.

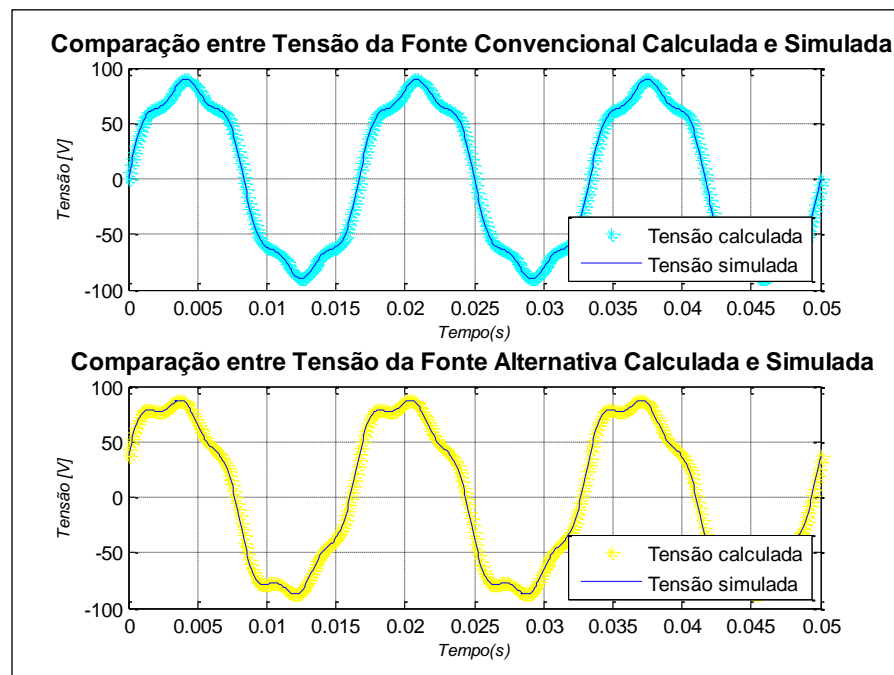


**Figura 2:** Representação de rotina de simulação para validação do modelo.

Realizando a simulação do sistema apresentado na Fig. 2 e comparando o seu resultado com os cálculos realizados por meio dos modelos matemáticos é possível determinar a validação do modelo obtido. Como se pode observar por meio das Fig. 3, (compreende as Eq. 11 e Eq. 5) e Fig. 4 (compreende a Eq. 1), o modelo matemático obtido é válido uma vez que os dados plotados por meio da simulação e das equações algébricas apresentam o mesmo comportamento.



**Figura 3:** Validação do modelo algébrico para os parâmetros de potência e corrente instantânea.



**Figura 4:** Validação do modelo algébrico para os valores de tensão dos geradores convencional e distribuído.

## CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DAS COMPONENTES DA POTÊNCIA

Conforme apresentado no Capítulo 2, estudos bibliográficos comprovam que as características do fluxo de potência constituem um fator de extrema relevância para determinação de níveis e índices de estabilidade, controle de tensão e qualidade de energia em sistema de distribuição com geração distribuída. Além disso, a teoria apresentada mostra que esta potência é composta de duas parcelas, cada qual produz impactos distintos no fluxo de potência de um sistema de distribuição com geração distribuída.

Neste panorama, utilizando como estudo de caso o sistema apresentado no Capítulo 3, este capítulo apresenta uma análise investigativa do comportamento da potência média no sistema de distribuição a partir de dois métodos, sendo que em ambos a influência de distorções harmônicas são consideradas. O primeiro método propõe a variação dos parâmetros de linha, ou seja, variação da reatância ( $L$ ) e resistência ( $R$ ) em torno dos valores determinados nominais. Já a segunda abordagem se dará por conta da variação dos parâmetros do gerador distribuído, caracterizados pela amplitude da tensão gerada ( $V_{GD\_fund}$ ) e do ângulo de defasagem do gerador ( $\beta$ ). Pretende-se com estas análises verificar qual a influência de cada um desses parâmetros no comportamento da potência média do sistema, sendo os objetivos desta análise semelhante à primeira. Adicionalmente, é apresentada uma análise da potência oscilante, com o intuito de identificar suas características e suas influências em sistemas com esta configuração.

- **Considerações para as análises**

Primeiramente, os efeitos do comprimento da linha de distribuição serão desconsiderados das análises, sendo os parâmetros de distribuição restritos aos valores de reatância indutância ( $L$ ) e resistência ( $R$ ) da linha. Além disso, dado que o foco do trabalho é a análise do fluxo de potência no sistema de distribuição devido a presença da geração distribuída, este trabalho não abrangerá fatores como carga acoplada e carregamento da linha.

Com o intuito de se evidenciar a influência das distorções harmônicas para o comportamento do fluxo de potência no sistema de distribuição, foram atribuídos valores de 10% referente à componente fundamental de cada harmônica mencionada.

#### 4.1. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE LINHA

A partir dos valores nominais definidos para os parâmetros de linha, propõe-se o intervalo de variação de  $\pm 50\%$  para o parâmetro da indutância da linha, compreendendo um excursão entre 0,001 e 0,01 H. Já para o parâmetro da resistência a proposta é variá-lo a partir do valor nulo até o valor  $0,1\Omega$ , o que representa uma variação percentual de  $\pm 100\%$ .

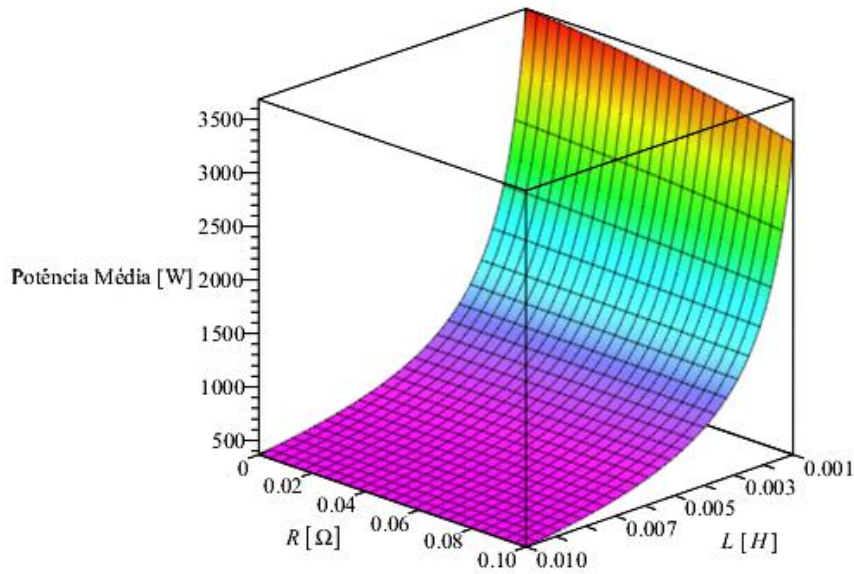
Tal representatividade de valores foi definida uma vez que, ao contrário dos sistemas de transmissão, redes de distribuição apresentam maiores valores de resistências do que reatância. Para as linhas de transmissão, os valores de reatância indutiva são muito maiores quando comparado com o valor da resistência, sendo assim a análise de fluxo de potência pode ser realizada negligenciando-se os valores de resistência. Os sistemas de distribuição por um outro lado não foram inicialmente designados para conexão de dispositivos de geração energia, além de apresentarem geralmente uma configuração radial ou anel, e não uma configuração híbrida como os sistemas de transmissão (DOUMBIA; AGBOSSOU, 2006).

Considerando inicialmente o caso em que não há presença de harmônicos, a partir da modelagem algébrica do fluxo de potência médio apresentado na Eq. 12, substitui-se os valores definidos no sistema estudado, obtendo-se assim a representação em função dos parâmetros L e R.

$$P_{med_{L_R(fund)}} = \frac{45 * (1,16 * 10^4 * L - 5,46 * R)}{1,42 * 10^5 * L^2 + R^2} \quad (14)$$

Graficamente este comportamento pode ser analisado através da Fig. 5.

**Comportamento da Potência Média dada Variação de Parâmetros de Linha L e R**



**Figura 5:** Variação do fluxo de potência médio dada variação de parâmetros de linha.

Na sequência, foram investigados os efeitos da inserção de diferentes níveis de harmônicas. Distorções de ordem maiores foram inseridas uma a uma à configuração original do sistema, sendo constatado, graficamente, um comportamento muito semelhante ao apresentado na Fig. 5. No entanto, algebricamente, verificou-se que a inserção das harmônicas introduz pequenos valores à componente fundamental da potência. Para esta nova situação o comportamento do fluxo de potência médio pode ser representado por meio da Eq. (15).

$$P_{med_{L,R(harm)}} = \frac{45 * (1,16 * 10^4 * L - 5,46 * R)}{1,42 * 10^5 * L^2 + R^2} + \sum_m^{\infty} f(L, R)_{[m]} \quad (15)$$

$$m = 3, 5, 7, \dots$$

A forma com que a Eq. 15 é apresentada evidencia em seu primeiro termo a representação do fluxo de potência médio para o caso do sistema sem a interferência de harmônicos. Conforme harmônicos são levados em consideração, uma somatória de termos, os quais também tem função de L e R, são adicionados ao termo principal. Este termos por sua vez não afetam

significativamente o comportamento do fluxo de potência médio comparado com o primeiro caso, sendo responsável por pequenos deslocamentos da curva da Fig. 5 no plano xyz.

## 4.2. RESULTADOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE LINHA

Foram obtidos alguns pontos do gráfico apresentado na Fig. 5 a fim de se observar com mais detalhes os efeitos das variações de  $L$  e  $R$  sobre o fluxo de potência médio, além da interferência que os harmônicos inserem. Estes valores podem ser analisados por meio da Tabela 2, sendo que na linha em destaque é apresentado os valores de potência média para a configuração nominal dos parâmetros  $L$  e  $R$ .

**Tabela 2:** Variação da potência média mediante variação de parâmetros de linha.

<b>L</b> <b>[H]</b>	<b>R</b> <b>[Ω]</b>	<b>P<sub>med_fund</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>3h_altern</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>3h_conv</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>3h_ambos</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>5h_altern</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>5h_conv</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>5h_ambos</sub></b> <b>[W]</b>
<b>0.001</b>	<b>0.000</b>	3685.415	3685.415	3685.415	3697.700	3685.415	3685.415	3705.071
<b>0.001</b>	<b>0.010</b>	3665.543	3665.543	3665.226	3677.807	3665.543	3665.112	3685.171
<b>0.001</b>	<b>0.100</b>	3281.574	3281.574	3278.432	3293.573	3281.574	3277.296	3300.854
<b>0.005</b>	<b>0.000</b>	737.083	737.083	736.803	739.540	737.083	737.083	741.014
<b>0.005</b>	<b>0.010</b>	736.371	736.371	736.357	738.826	736.371	736.353	740.301
<b>0.005</b>	<b>0.100</b>	728.116	728.116	727.990	730.565	728.116	727.944	732.036
<b>0.010</b>	<b>0.000</b>	368.541	368.541	368.541	369.770	368.541	368.541	370.507
<b>0.010</b>	<b>0.010</b>	368.366	368.366	368.363	369.594	368.366	368.361	370.331
<b>0.010</b>	<b>0.100</b>	366.554	366.554	366.552	367.780	366.554	366.511	368.517



Além idso, para auxiliar na interpretação dos resultados os valores eficazes da corrente do sistema ( $I$ ) bem como das tensões do gerador convencional ( $V_{conv}$ ) e do gerador alternativo ( $V_{altern}$ ) são foram determinados por meio das Eq. 16, 17 e 18, respectivamente, sendo seus valores apresentados na Tabela 3 para cada configuração de distorção harmônica.

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t (i_{inst})^2 dt} \quad (16)$$

$$V_{conv\_eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t \left( \sum_m V_{conv[k]} \sin(m\omega t) \right)^2 dt}, \quad m = 3, 5, 7, \dots \quad (17)$$

$$V_{altern\_eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t \left( \sum_m V_{altern[m]} \sin(m\omega t + \beta) \right)^2 dt}, \quad m = 3, 5, 7, \dots \quad (18)$$

**Tabela 3:** Valores de tensões e corrente eficaz para os diferentes índices de harmônicos.

		$P_{med\_fund}$	$P_{3h\_altern}$	$P_{3h\_conv}$	$P_{3h\_ambos}$	$P_{5h\_altern}$	$P_{5h\_conv}$	$P_{5h\_ambos}$
Valores eficazes	$I [A]$	11.76	11.81	11.81	11.76	11.83	11.83	11.76
	$V_{conv} [V]$	63.64	63.64	63.96	63.96	63.64	64.27	64.27
	$V_{alter} [V]$	63.64	63.96	63.64	63.96	64.27	63.64	64.27

Como era de se esperar a medida que a impedância do sistema aumenta, representada pelo aumento dos valores de  $L$  e  $R$ , mantida a tensão constante, a potência diminui conforme Lei Clássica de Teoria das Potências (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007)

A primeira conclusão que se obtém é que, apesar da variável  $L$  abranger um intervalo de variação 10 vezes menor do que a variável  $R$ , as variações do parâmetro de indutância apresentam maior representatividade na variação do valor médio do fluxo de potência do que as variações de resistência, para todos os casos de harmônicos. Este comportamento é esperado dada a não-linearidade que o parâmetro da indutância representa em sistemas elétricos (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Esta não linearidade além de ser observada nos valores da Tabela 2, é graficamente constatada por meio do crescimento exponencial dada a redução nos valores de indutância. Algebricamente este fenômeno pode ser verificado por meio das Eq. 14 e 15, onde se observa que as constantes de multiplicação da variável  $L$  apresentam valores consideravelmente maiores do que as constantes de multiplicação da variável  $R$ .

Tomando como base a configuração nominal do sistema apresentada na linha em destaque, verifica-se que para variações lineares negativas e positivas dos parâmetros de linha, o valor médio do fluxo de potência varia percentualmente de -50% a 400%, aproximadamente, respectivamente. Com isso pode-se afirmar que a região compreendendo valores abaixo dos valores nominais apresentaram maior sensibilidade na variação da potência média por meio dos parâmetros de linha  $L$  e  $R$ .

Considerando o cenário de sistemas de distribuição com geração distribuída este fato leva a conclusões interessantes sobre a operação do sistema. Dependendo da quantidade e do grau de penetração dos geradores distribuídos conectados em uma rede de distribuição se faz necessário reconfigurar alguns dispositivos da rede para que continue atendendo os requisitos de operação, tais como modificação de *tap* de transformadores e bancos de capacitores para o ajuste de perfil de tensão e reprogramação de relés para coordenação da proteção. No entanto, estas modificações podem acarretar alterações nos valores de indutância e resistência das linhas do sistema, o que por sua vez afeta o fluxo de potência médio. Como visto, o acréscimo de  $L$  e  $R$  provocam uma redução na potência, podendo o aumento de  $L$  e  $R$  no sistema ser caracterizado pela inserção de dispositivos em série no sistema de distribuição. Caso o sistema necessite ser modificado com a implementação de dispositivos em paralelo, sua impedância e resistência contribuirão para redução da  $L$  e  $R$  do sistema como um todo, o que como visto nesta simulação, mesmo para pequenas variações, principalmente de  $L$ , resultam em significante alterações do fluxo de potência médio.

Analisando o comportamento do fluxo de potência médio dada a inserção de harmônicos verifica-se que três cenários distintos:

- Distorções Harmônicas fornecidas pelo gerador distribuído

Nesta configuração, a distorção harmônica não apresenta influência sobre o valor do fluxo de potência médio e verifica-se que o valor médio da potência é o mesmo apresentado estando o sistema sem harmônicos, conforme apresentado nas colunas 3, 4 e 7 da Tabela 2. De acordo com a Tabela 3, verifica-se uma elevação da tensão eficaz do gerador distribuído, que por consequência, provoca um aumento da corrente eficaz. Esse acréscimo de corrente por sua vez não é transformado em aumento de potência média, uma vez que tais harmônicos não interagem com a fonte convencional de energia.

- Harmônico fornecido pelo gerador convencional

Nesta configuração a distorção harmônica contribui para a diminuição do valor do fluxo de potência médio quando comparado com sistema sem harmônicos, conforme apresentado na Tabela 2 nas colunas 3, 5 e 8. Por meio da Tabela 3 verifica-se para esta configuração um aumento da tensão eficaz do gerador convencional e da corrente do sistema. A consequência sobre o fluxo de potência médio é uma leve redução de seu valor comparado com o caso sem harmônicos.

- Harmônicos fornecidos por ambos os geradores

Nesta configuração, a distorção harmônica contribui para o aumento do valor da potência média quando comparado com sistema sem harmônicos, conforme valores das colunas 3, 6 e 9 da Tabela 2. É percebido o aumento da tensão eficaz de ambas as fontes permanecendo a corrente eficaz com o mesmo valor apresentado para a configuração do sistema sem harmônicos. Para a 3ª harmônica, o incremento na tensão eficaz em ambos os geradores foi de 0,5%. Quando se considera a 5ª esse valor passa a representar 1,3% da tensão eficaz do sistema sem harmônicos, como pode ser observado nas colunas 6 e 9 da Tabela 3.

Para um sistema de geração distribuída este resultado se torna extremamente interessante, uma vez que se tem conhecimento do elevado grau de distorções harmônicas que os conversores dos geradores distribuídos injetam na rede. Sabendo do comportamento de cada harmônica é possível definir estratégias para suprimir as que mais afetam o Sistema ou prejudicam o fluxo de potência.

### 4.3. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO

Para a análise do fluxo de potência médio determinou-se a variação de do ângulo de geração do gerador distribuído ( $\beta$ ) entre 10 e 30°, representando uma variação percentual de  $\pm 50\%$ . Já para a variação da amplitude da tensão gerada pela fonte alternativa foi proposto uma variação percentual de  $\pm 30\%$ , correspondente a valores absolutos entre 60 e 120 V. A definição por estes intervalos se deu baseada em estudos de limites operacionais de geradores distribuídos convencionais, os quais demonstraram que esta faixa de controle é aceitável (DOUMBIA; AGBOSSOU; DOSTIE, 2006).

Adotou-se o mesmo procedimento que a variação dos parâmetros de linha, sendo que neste ponto a modelagem da potência média apresentada na Eq. 12 é expressa em termos do ângulo de geração e da tensão do gerador distribuído. Para o caso de ausência de distorções harmônicas a representação do fluxo de potência médio é dada pela Eq. 19

$$P_{med_{V_{GD}\beta(fund)}} = V_{GD_{fund}}(28,87 * \sin(\beta) + 0,13 * \cos(\beta)) - 11,4 \quad (19)$$

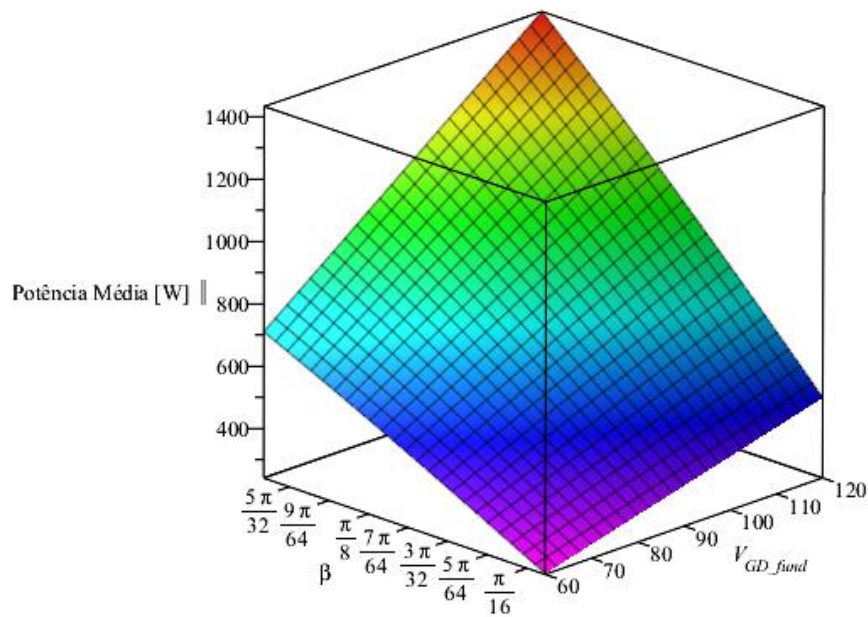
O comportamento da potência média dada a variação de parâmetros de geração pode ser verifica em mais detalhes através da Fig. 6.

Prosseguindo, foram inseridos diferentes níveis de harmônicos no sistema a fim de verificar qual a sua influência no comportamento do fluxo de potência médio. Conforme as distorções são inseridas uma a uma, o comportamento gráfico que se observa é algo muito semelhante ao apresentado na Fig. 6. Numericamente, verificou-se que a introdução de harmônicos é responsável por adicionar pequenas parcelas ao valor da potência média. Pode-se dizer que para esta situação o fluxo de potência média do sistema é representado pela Eq. 20.

$$P_{med_{V_{GD}\beta(fund)}} = V_{GD_{fund}}(28,87 \sin(\beta) + 0,13 \cos(\beta)) - 11,4 + \sum_m^{\infty} f(\beta)_{[m]} \quad (20)$$

$$m = 3,5,7, \dots$$

Comportamento da Potência Média dada Variação de Parâmetros de Geração ângulo de geração ( $\beta$ ) e Tensão da Geração Distribuída ( $V_{GD\_fund}$ )



**Figura 6:** Variação do fluxo de potência médio dada variação de parâmetros de geração.

A Eq. (20) evidencia na primeira parcela o fluxo médio relacionada ao caso sem harmônicos, sendo a influência da inserção dos harmônicos representada pelo somatório da função adicional. Quando comparado diferentes harmônicos com o caso fundamental verifica-se que as modificações no sistema oriundas dos harmônicos apresentam pouca representatividade no fluxo de potência médio, uma vez que estes efeitos são observados em pequenos deslocamentos no plano xyz no gráfico da Fig. 6.

#### 4.4. RESULTADOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO

Os pontos de extremo e médio dos intervalos de variação foram obtidos da Fig. 6 e inseridos na Tabela 4 a fim de se obter maiores informações sobre o comportamento do fluxo de potência médio quando se considera a variação dos parâmetros de geração. Na linhas em destaque é

apresentado os valores de potência média para a configuração nominal dos parâmetros do sistema, sendo possível observar que os valores na linha verde das Tabelas 2 e 4 se equivalem.

**Tabela 4** Variação da potência média mediante variação de parâmetros de geração

$V_{GD}$ [V]	$\beta$ [°]	$P_{med\_fund}$ [W]	$P_{3h\_altern}$ [W]	$P_{3h\_conv}$ [W]	$P_{3h\_ambos}$ [W]	$P_{5h\_altern}$ [W]	$P_{5h\_conv}$ [W]	$P_{5h\_ambos}$ [W]
60	10	244.067	244.067	244.054	245.306	244.067	244.054	246.050
60	20	485.562	485.562	485.549	488.010	485.562	485.549	489.480
60	30	710.640	710.640	710.627	714.215	710.640	710.627	716.361
90	10	371.800	371.800	371.787	373.039	371.800	371.787	373.783
90	20	734.042	734.042	734.030	736.490	734.042	734.030	737.960
90	30	1071.659	1071.659	1071.646	1075.234	1071.659	1071.646	1077.380
120	10	499.533	499.533	499.520	500.772	499.533	499.520	501.516
120	20	982.523	982.523	982.510	984.971	982.523	982.510	986.440
120	30	1432.678	1432.678	1432.666	1436.254	1432.678	1432.666	1438.400

Verifica-se por meio dos valores da Tabela 4 e da Fig. 6 que, à medida que os parâmetros de geração aumentam a potência média também aumenta. Maiores valores de tensão de gerada produzem maiores valores de potência, pois de acordo com a teoria das potências a potência tensão é diretamente proporcional à tensão. Já o aumento do ângulo de geração pode ser representado operacionalmente por um acréscimo no torque dos geradores.

Analisando a Fig. 6 e a Tabela 4 verifica-se que a variação linear dos parâmetros de geração resulta em uma variação praticamente linear da potência média. Este comportamento é esperado por parte da variável de tensão, pois analisando a Eq. 20 observa-se que esta variável representa um fator multiplicativo na equação. No entanto, para o ângulo de geração era esperado um comportamento não-linear pelo fato deste parâmetro representar o argumento das funções seno

e cosseno. Este comportamento pode ser justificado pela pequeno intervalo de variação adotado para a variável  $\beta$ , sendo que nesta situação  $\sin(\beta)$  pode ser aproximado para  $\beta$  e quando se tem  $\cos(\beta)$ , pode-se aproximar o valor para 1.

Levando estes resultados para a discussão de geradores distribuídos na rede de distribuição, quando se analisa somente o fluxo de potência médio do sistema, o aumento da tensão do gerador distribuído e do seu respectivo ângulo de geração no intervalo analisado, produz um efeito vantajoso para o sistema por proporcionar maior potência ativa na rede, diminuindo assim a demanda da subestação.

Considerando a inserção de harmônicos a primeira observação que se faz é que, para esta configuração de sistema, a potência média é composta por um termo fundamental mais um somatório representando as variações propostas pelos distúrbios harmônicos. No entanto, diferentemente do caso da variação dos parâmetros de linha, para a variação dos parâmetros de geração a função que representa a adição dos termos harmônicos é somente dependente de uma das variáveis, a variável  $\beta$ . Tal fato pode ser atribuído à condição inicial imposta à análise de que a amplitude das harmônicas apresentassem valores constantes (amplitude das harmônicas foram mantidas em 9V), apesar da componente fundamental ter sido variada. Como a amplitude das distorções harmônicas é função da amplitude da componente fundamental, caso essas não assumissem valores fixos, a variável de tensão de geração contribuiria para a parcela das distorções harmônicas nesta análise.

Ainda avaliando o impacto das distorções harmônicas, assim como para o caso anterior, quando qualquer ordem de harmônico é inserida pela fonte alternativa nenhum efeito é sentido pela potência média, sendo seu valor idêntico à configuração sem harmônicos, conforme apresentado na Tabela 4 nas colunas 3, 4 e 7. Esta fato evidencia que quando o gerador distribuído insere componentes harmônicos na rede seus efeitos perceptíveis no fluxo de potência médio do sistema.

Quando o harmônico é inserido pela fonte convencional, como mostrado nas colunas 5 e 8 da Tabela 4, percebe-se uma ligeira redução na potência média na ordem de 0,002% quando comparado com o valor do sistema sem harmônicos. Interessante notar que, indiferente da ordem dos harmônicos esta variação é mantida, como pode ser visto por meio dos dados da 3ª e 5ª harmônicas. Este fato pode ser compreendido devido a questão da adição dos harmônicos

estar somente relacionada com  $\beta$ , termo este que como mostrado não afeta significativamente o sistema.

Por fim, quando o harmônico é fornecido por ambas as fontes verifica-se um acréscimo de 0,5% para o 3ª ordem e 0,8% na 5ª para valores de potência média. Verifica-se com isso que conforme a ordem dos harmônicos é aumentada menores são os termos acrescidos no fluxo de potência médio.

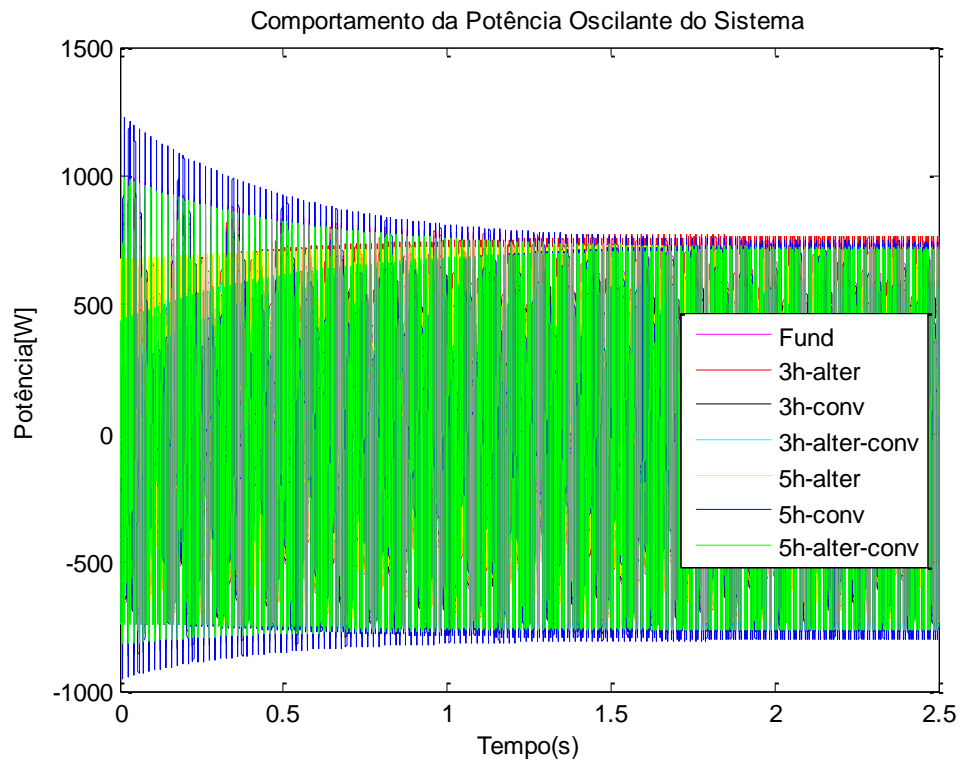
Mais uma vez, como no caso da análise dos parâmetros de linha, do ponto de vista da potência média o fornecimento de harmônicos pela fonte alternativa não influencia seu comportamento, porém quando ambas as fontes produzem harmônicos um acréscimo da potência média é observada no sistema.

#### **4.5. ANÁLISE DA POTÊNCIA OSCILANTE**

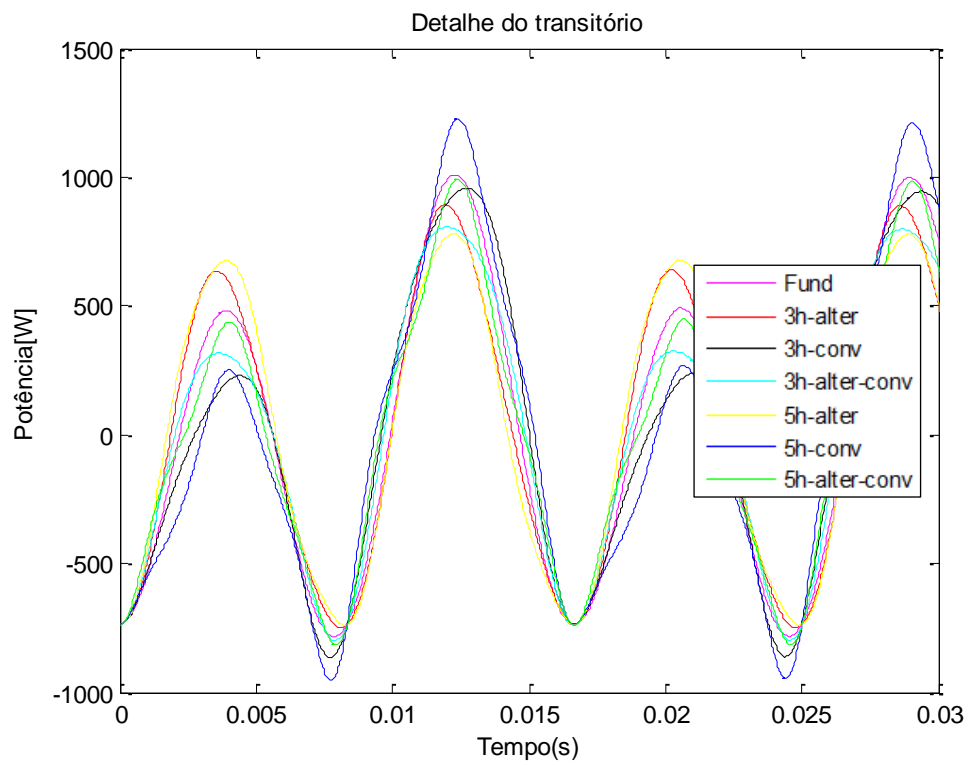
Conforme apresentado na literatura a potência oscilante representa a parcela de energia que não produz trabalho, porém afeta diretamente as características do sistema de distribuição. Para sistemas monofásicos, sabe-se que esta componente compreende a potência reativa e demais distorções do sistema. No entanto, nesta análise estas parcelas não serão estudadas separadamente, podendo-se considerar como componente oscilante toda a parcela de potência que não é classificada como potência ativa.

Para os valores nominais do sistema, de acordo com a Eq. (13), níveis de distorções harmônicas são inseridas no sistema tanto pelo gerador convencional como pelo gerador distribuído, conforme apresentado na Fig. 7. Estas harmônicas se somam à componente fundamental e contribuem para a elevação da amplitude da potência. Por meio das Fig 8 e 9 é possível analisar em detalhes o comportamento da oscilação no transitório inicial e no regime permanente, respectivamente.

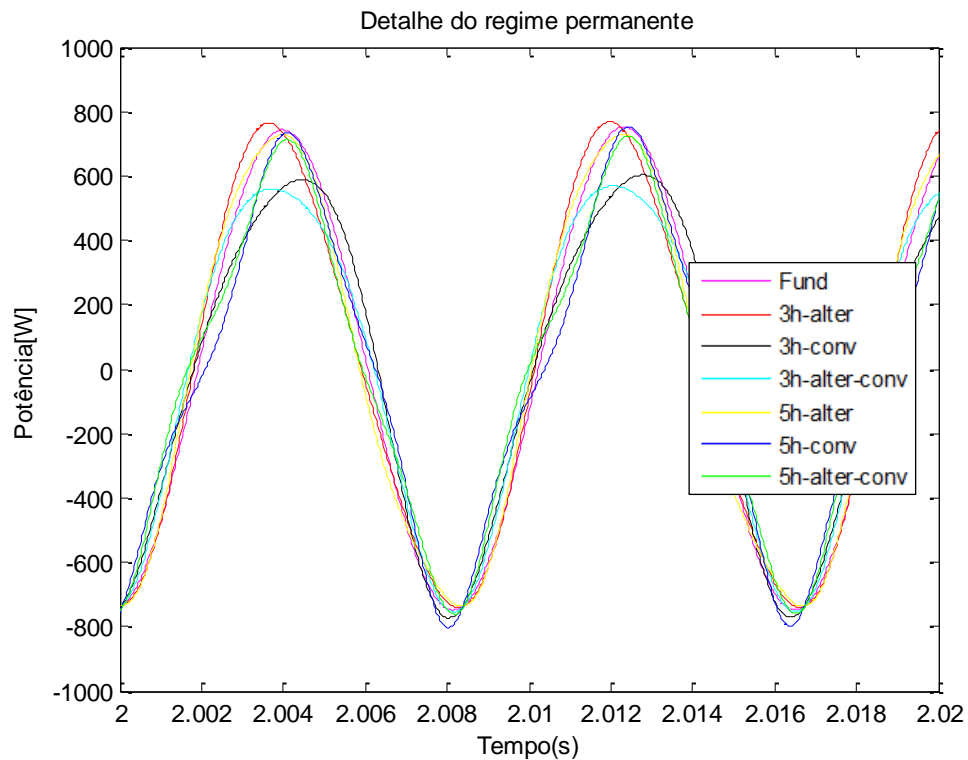




**Figura 7:** Variação da potência oscilante com interferência de harmônicas.



**Figura 8:** Detalhe do transitório da potência oscilante.



**Figura 9:** Detalhe do regime permanente da potência oscilante.

## 4.6. RESULTADOS DA POTÊNCIA OSCILANTE

As Fig. 7, 8 e 9 apresentam os resultados das análises do comportamento da potência oscilantes para a configuração nominal. Diferentes níveis de distorção harmônicas foram analisadas sendo possível obter algumas conclusões pertinentes para o estudo da geração distribuída.

Primeiramente verifica-se que a consideração desta parcela do fluxo de potência é de grande importância nas análises de fluxos de potência em sistemas de distribuição, uma vez que os picos de potência apresentam a mesma ordem de grandeza que o fluxo de potência médio.

O gráfico da Fig. 7 deixa evidenciado o comportamento específico de cada componente harmônico. Do ponto de vista operação e proteção de sistemas de energia este dado resulta em informações relevantes, pois se fornece meios de identificar as distorções mais prejudiciais ao sistema e se for o caso desenvolver mecanismos de anulação ou atenuação dessas componentes.

Analisando o transitório da potência oscilante por meio das Fig. 7 e 8, verifica-se que a configuração do sistema em que o gerador convencional fornece componentes harmônicos de 5ª ordem apresenta picos mais salientes, seguida da configuração em que o sistema não apresenta harmônicos.

Na condição de regime permanente, a configuração que apresenta maiores picos de potência oscilante é quando o gerador alternativo fornece componentes de 3ª harmônicas.



## CAPITULO 5 - CONCLUSÕES

O crescimento da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica tem atingido expressivos níveis nos últimos anos. Os atrativos para o investimento nesse tipo de geração de energia são muitos: excelente retorno financeiro dado o baixo custo de implementação das unidades geradoras; aproveitamento de recursos locais proporcionando a utilização de fontes sustentáveis; alternativa para o elevado preço da energia no cenário nacional; e possibilidade de geração de lucro por meio da venda da energia produzida. Além do mais, a integração de geradores distribuídos em sistemas de distribuição proporcionam estratégias para melhor controle de requisitos e parâmetros do sistema, tais como qualidade de energia, níveis de tensão e demanda de energia proveniente dos alimentadores primários. Em contra partida a esses pontos apresentados, se faz necessário avaliar os demais impactos que geradores alternativos proporcionam aos sistemas de distribuição, dentre os quais, pode-se destacar o o fluxo de potência como sendo um dos fatores mais críticos.

A introdução de geradores distribuídos ao longo do sistema de distribuição ocasionam o fenômeno de fluxos de potência bidirecionais, os quais relacionam-se diretamente com as perdas do sistema, margens de operação do sistema e interferem em requisitos do sistema de proteção. Por essas razão, se faz necessário analisar quais as influências que a geração distribuída acarretam sobre o fluxo de potência em um sistema de distribuição. Nessa temática, este trabalho propôs a investigação do comportamento do fluxo de potência, considerando sua parcela média e oscilante, em um sistema de distribuição experimental. Outro elemento de relativa importância foi levado em consideração, que são as distorções harmônicas provocadas pela conexão dos geradores distribuídos. Por meio da variação de parâmetros de linha (resistência e indutância) e parâmetros de geração (amplitude de tensão e ângulo de geração do gerador distribuído) foi possível observar como que o fluxo de potência é afetado pela inserção da geração distribuída.

Na análise do fluxo de potência médio foi possível verificar que o parâmetro de indutância do sistema apresenta impactos mais significativos sobre esta grandeza do que o parâmetro de resistência. Sendo assim, qualquer alteração no sistema de distribuição acarretada pela conexão de geradores distribuídos que venham interferir nesses parâmetros influenciará no fluxo de potência médio desse sistema. Quando analisado a variação dos parâmetros de geração, foi

evidenciado a variação linear do fluxo de potência frente a variação linear dos parâmetros, destacando que o parâmetro de tensão não apresenta nenhuma ação quando se acrescenta harmônicos ao sistema. Através das duas abordagens comprovou-se que diferentes níveis de distorções harmônicas causam diferentes efeitos no fluxo de potência médio do sistema, sendo observado que somente para a configuração de fornecimento de componentes harmônicos por ambos os geradores ocorreu a elevação do fluxo de potência do sistema.

Com isso, pode-se considerar satisfatório os resultados apresentados nestas análises, uma vez que foi possível constatar a influência da conexão de geradores distribuídos no fluxo de potência de sistemas de distribuição. Ao fim deste trabalho é possível identificar alguns pontos de sugestão para uma análise complementar. Em trabalhos futuros pode-se aplicar o conceito aqui abordado em um sistema de distribuição, adicionar a influência de mais componentes harmônicas além de investigar a influência de outros parâmetros sobre o fluxo de potência médio e oscilante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 389 p.

ALMEIDA, Carlos Frederico Meschini. **Fontes Distribuídas de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. 2012. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ALNASER, Sahban W.; OCHOA, Luis F.. *Optimal Sizing and Control of Energy Storage in Wind Power-Rich Distribution Networks*. **Ieee Transactions On Power Systems**, Manchester, UK, v. 31, n. 3, p.2004-2013, maio 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrs.2015.2465181>.

AYRES, Hugo Murici. **Desenvolvimento de metodologias de análise de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2010. 205 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

BARKER, Philip P.; MELLO, Robert W. de. *Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems*. **Power Engineering Society Summer Meeting**, Seattle, US., v. 3, n. 1, p.1645-1656, jun. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/pess.2000.868775>.

CARVALHO, Roberto Cunha de. **Conexão da Geração Distribuída de Consumidores Industriais em Paralelo com o Sistema de Distribuição e de Transmissão de Concessionárias de Energia Elétrica**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

COSTA, Juliana Portugal da. **Análise Estática e Dinâmica da Rede de Distribuição com Presença de Geração Distribuída Utilizando o Software Simulight**. 2014. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia da Universidade do Pará, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

DOUMBIA, Mamadou L.; AGBOSSOU, Kodjo; DOSTIE, Michel. *Power Transfer Analysis in a Utility-Interconnected Fuel Cell Distributed Generator*. **Iecon 2006 - 32nd Annual Conference On Ieee Industrial Electronics**, Quebec, Canada, p.4331-4336, nov. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/iecon.2006.347398>.

EL-KHATTAM, W; SALAMA, M.m.a. *Distributed generation technologies, definitions and benefits*. **Electric Power Systems Research**, [s.l.], v. 71, n. 2, p.119-128, out. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2004.01.006>.

LEONARDO, Murilo Henrique Santos. **Análise do Impacto da Geração Distribuída nas Perdas e no Carregamento de Linhas de um Sistema de Subtransmissão**. 2014. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

LEVIN, Boris. *Theorem on oscillating power*. **2015 Xxth Ieee International Seminar/workshop On Direct And Inverse Problems Of Electromagnetic And Acoustic Wave Theory (diped)**, Holon, Israel, p.18-22, set. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/diped.2015.7324237>.

LOPES, J.a. Peças et al. *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities*. **Electric Power Systems Research**, Manchester, UK, v. 77, n. 9, p.1189-1203, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.016>.

LUIZ, Cicéli Martins. **Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MARAFIÃO, F. P. **Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2000.



MARQUES, Frederico A. S. et al. *Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Proceedings Of The 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, p.1-6, dez. 2006. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 10 out. 2016.

MEDEIROS, M. F. D.; P. FILHO, M. C.; OLIVEIRA, C. B. M.. *A method for definition of the active power limits of distributed generation through an optimal. Cired 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, Lisbon, v. 1, n. 1, p.1-4, maio 2012. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2012.0887>.

MORALES, H. K., **Teoria de Potência Conservativa: Uma nova Abordagem Para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades**. 2011, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2011

PALUDO, Juliana Aramizu. **Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Regime Permanente**. 2014. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

RICCIARDI, T. R. et al. *Sustainable energy and distributed generation scenario in the Brazilian electricity sector. 2012 Ieee Power And Energy Society General Meeting*, p.1-7, jul. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/pesgm.2012.6344859>.

ROSSI, Douglas. **Análise do Impacto de um Gerador Síncrono de Médio Porte Conectado em Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2007. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SARABIA, Angel Fernández. **Impact of distributed generation on distribution system**. 2011. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engineering, Department Of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, 2011.

SEVERINO, Mauro Moura; CAMARGO, Ivan Marques de Toledo; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. *Geração Distribuída: Discussão Conceitual e Nova Definição. Revista Brasileira de Energia*, Brasília, v. 14, n. 1, p.47-69, jan. 2008.

SILVA, Helen Christian. **Impacto da Conexão de Produtores Independentes de Energia no Congestionamento de Redes de Transmissão.** 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

STRBAC, Goran; RAMSAY, Charlotte; PUDJIANTO, Danny. **Integration of Distributed Generation into the UK Power System.** 2007. 26 f. Monografia (Especialização) - Curso de Electrical Engineering, Dti Centre For Distributed Generation And Sustainable Electrical Energy, London, 2007.

TREVISAN, Aramis Schwanka. **Efeitos da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão.** 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

UQAILI, Muhammad Aslam et al. *Impact of distributed generation on network short circuit level.* **2014 4th International Conference On Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory And Aerospace & Electronic Systems (vitae)**, Aalborg, p.1-5, maio 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/vitae.2014.6934455>.

WANG, Fei; DUARTE, J.I.; HENDRIX, M.. *Active and reactive power control schemes for distributed generation systems under voltage dips.* **2009 Ieee Energy Conversion Congress And Exposition**, Eindhoven, Netherlands, p.3564-3571, set. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/ecce.2009.5316564>.