



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 097

Tópico: Modelagem e Simulações

## ANÁLISE DOS EFEITOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA SOB O ENFOQUE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Fabio Lima de Albuquerque  
UFU

Adélio José de Moraes  
UFU

Geraldo Caixeta Guimarães  
UFU

Luciano Martins Neto  
UFU

Sérgio Manuel R. Sanhueza  
UFU

Marcelo Fandi  
UFU

### RESUMO

Neste trabalho são realizados estudos, através de simulações computacionais, para avaliar o comportamento do sistema elétrico de potência quando uma parcela de sua demanda é suprida por pequenos geradores distribuídos na rede. Estes podem ser representados como: gerador síncrono, gerador de indução ou fonte dc mais inversor. São verificadas as vantagens e desvantagens relativas entre as alternativas de geração citadas tanto em regime permanente como em regime transitório.

### PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, Fontes renováveis, gerador síncrono, gerador de indução, fonte dc mais inversor.

### 1.0 – INTRODUÇÃO

Atualmente, a principal característica do sistema elétrico de potência brasileiro é a utilização de grandes usinas, centralizando a geração de energia elétrica, com o transporte desta através de extensas redes de transmissão e distribuição. À medida que a demanda cresce, as concessionárias têm a necessidade de ampliar o parque gerador e, adicionalmente, construir novas linhas de transmissão e distribuição. Porém, a adoção deste tipo de sistema como a única alternativa para atender o aumento de demanda resulta em acréscimo das perdas nestas redes devido às longas distâncias entre os locais de geração e consumo.

Neste sentido, tem surgido recentemente uma

nova opção, denominada Geração Distribuída, na qual os geradores são situados próximos dos consumidores. Um estudo feito pela Electric Power Research Institute (EPRI) indica que, em 2010, 25% das novas gerações serão de forma distribuída, e em uma pesquisa realizada pela Natural Gas Foundation concluiu que este valor pode chegar a 30% [1]. O European Renewable Energy Study (TERES), comissionado pela União Européia (EU) para examinar a viabilidade da meta de redução de CO<sub>2</sub> na Europa e implementação da energia renovável, concluiu que, cerca de 60% do potencial de energia renovável que pode ser utilizado até 2010, será categorizado como geração elétrica descentralizada [2]. Este tipo de alternativa oferece para as concessionárias elétricas um meio de aumentar a disponibilidade de energia localmente, eliminando o inconveniente do transporte desta para os centros consumidores.

Uma das principais motivações para o aumento no interesse dos investidores em geração de energia de forma descentralizada é a possibilidade de serem operadas por produtores independentes e terem condições de serem conectadas diretamente aos sistemas de distribuição. Além disso, caso a produção de pequenos blocos de energia seja feita através de fontes renováveis, tais como pequenas centrais hidrelétricas, geradores eólicos, células combustíveis, células fotovoltaicas, etc., resulta em um pequeno impacto ambiental. Assim, pequenas gerações distribuídas podem ser previstas para operar em paralelo com o sistema de distribuição principal, mas sem a responsabilidade de participar no controle do sistema, o qual é coordenado pela

concessionária. Contudo, alguns geradores têm potencial para controle de tensão, como o gerador síncrono e a fonte dc associada com o inversor, enquanto outros tipos não possuem este tipo de controle (ex. gerador de indução). Normalmente este tipo de fornecimento praticamente não exerce efeito no sistema, porém, dependendo da porcentagem da geração distribuída que é inserida, este pode sofrer um impacto significativo, representado principalmente pela influência na qualidade do suprimento e em itens como perfil de tensão do alimentador, fluxos de potência e níveis de curto circuito. Na maioria das vezes, a influência da geração distribuída, devido ao seu pequeno porte, é local ou regional. Alguns destes impactos possuem características positivas como: suporte de tensão através do fornecimento de energia reativa local, melhoria da qualidade de suprimento, redução das perdas, melhoria do fator de potência, liberação da capacidade de atendimento, possibilidade de ilhamento para atendimento de carga local, melhoria na curva de carga, redução nos custos de expansão da rede e a prorrogação de novos investimentos na construção de grandes usinas. Entretanto, surgem algumas questões críticas na operação do sistema com a conexão de novos agentes geradores de energia elétrica, como: aumento nos níveis de curto circuito e surgimento de harmônicos devido à fonte dc mais inversor. Assim, três tipos básicos de geração distribuída foram modelados, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Modelos de Geração Distribuída e aplicações

Gerador	Aplicação
Gerador Síncrono	Pequenas Centrais Hidrelétricas
Gerador de Indução com Compensação	Pequenas Centrais Hidrelétricas e Turbinas eólicas
Fonte dc mais inversor	Gerador fotovoltaico e Célula combustível

## 2 – PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DOS GERADORES UTILIZADOS

### 2.1 – Gerador síncrono

O gerador síncrono pode gerar tanto potência ativa, quando é fornecido torque mecânico da turbina, como potência reativa quando é inserida uma corrente contínua de excitação no rotor da máquina, a qual é denominada corrente de campo. Devido a estas características o gerador síncrono não necessita de uma excitação externa provindo da rede elétrica e, pelo contrário, pode fornecer ou consumir reativos ou permanecer com fator de potência unitário, de acordo com os ajustes na sua excitação, proporcionando um melhor equilíbrio no perfil de tensão.

### 2.2 – Gerador de indução

Para operação como gerador, o motor de indução deve ser conectado a uma fonte externa de corrente alternada e ser acionado por uma turbina, a qual lhe fornece potência mecânica como fonte primária, fazendo com que sua velocidade fique acima da síncrona (frequência da rede elétrica).

Neste modo de operação como gerador, a potência ativa flui da máquina para o sistema, enquanto que a potência reativa necessária para sua excitação é proveniente da fonte externa [3]. A excitação pode ser suprida ao gerador por duas formas diferentes. A primeira, através de sua conexão ao sistema de potência. A outra forma é através de um banco de capacitores instalados em seus terminais.

A potência reativa absorvida pelo gerador de indução varia pouco em relação à potência ativa fornecida por este, isto é, tanto faz este gerador funcionar a vazio ou com carregamento nominal, a absorção de reativos permanecerá praticamente inalterado.

### 2.3 – Fonte dc mais inversor

Para este caso, a geração de energia pode ser feita através de banco de baterias, célula combustível ou sistema solar fotovoltaico. Para estes tipos de fornecimento de energia, a tensão é gerada em nível contínuo (dc). Devido a este fato, a conexão com a rede deve ser feita através de um inversor. Diferentemente das máquinas síncronas, os inversores não possuem um vínculo natural entre potência ativa e frequência, nem entre tensão de saída e demanda de reativo. Para a conexão do inversor a uma barra infinita, é necessário que estes vínculos sejam criados por um sistema de controle a fim de manter uma operação estável. O inversor utilizado aqui apresenta um controlador PWM clássico. A senóide de referência de tensão fornecida ao controlador é gerada através dos sinais de amplitude e frequência definidos pela rede.

Através deste controle, o inversor pode gerar potência ativa e tanto gerar como consumir potência reativa de acordo com a necessidade.

## 3 – O SISTEMA EM ESTUDO

A figura 1 apresenta um diagrama esquemático do sistema analisado. Este consiste de um transformador com conexão delta-estrela aterrado de 45 kVA – 13,8/0,22 – 0,127kV com resistência percentual de 1,73 e reatância percentual de 3,04, alimentando um total de 19 consumidores residenciais conectados à rede de distribuição. Cada residência possui um consumo médio mensal de 300 kWh e um perfil de carga

com alto consumo de potência reativa, a qual é uma característica típica de cargas residenciais como mostra as referências [4] e [5].

As cargas representadas são as somatórias das potências das residências conectadas em cada ponto de ligação, como mostra a tabela 2. Estes valores são para o período de ponta, o qual representa a situação mais crítica do sistema. Estas cargas foram modeladas como impedância constante devido serem residenciais, as quais possuem estas características.

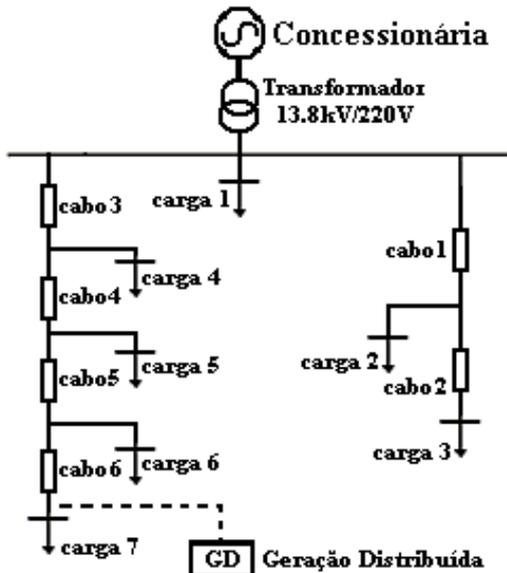


Figura 1 – Sistema utilizado na simulação

Tabela 2: Valores das cargas alimentadas pelo transformador

Carga	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
Carga 1	12,0	9,0
Carga 2	2,0	1,5
Carga 3	7,0	4,0
Carga 4	2,0	1,2
Carga 5	2,5	2,0
Carga 6	4,0	2,5
Carga 7	5,0	4,0

O cabo utilizado na rede de distribuição de baixa tensão é o de alumínio-CA 1/0, os quais são amplamente utilizados nas linhas de distribuição. As simulações e análises foram realizadas através do software SABER [6].

Foi inserida a geração distribuída no ponto de conexão da carga 7, como mostrado na figura 1, devido ser o local onde a queda de tensão é mais acentuada.

A geração distribuída possui um valor equivalente a 8 kW de potência nominal, a qual representa aproximadamente 18% do valor da potência nominal do transformador que esta alimentando o sistema.

Três tipos de geradores foram analisados: o

gerador síncrono, o gerador de indução com compensação de reativos através do banco de capacitores e a fonte dc mais inversor.

As características elétricas e os comprimentos dos cabos que conectam o transformador às cargas estão mostradas na tabela 3.

As potências elétricas fornecidas pelos geradores para o sistema e do banco de capacitores estão mostradas na tabela 4.

Tabela 3: Características elétricas e comprimento dos cabos

Cabo de alumínio – CA 1/0 R = 0,6375 [Ω/km] L = 0,4287 [Ω/km]	
Cabo 1	40 m
Cabo 2	80 m
Cabo 3	30 m
Cabo 4	40 m
Cabo 5	30 m
Cabo 6	30 m

Tabela 4: Características elétricas do capacitor e dos geradores utilizados

Gerador	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kVAr]
Gerador Síncrono	8,0	+2,2
Gerador de Indução	8,0	-4,2
Fonte dc + inversor	8,0	+3,5
Banco de Capacitor	0,0	+4,0

Nota: Potência reativa fornecida com sinal +

#### 4 – SIMULAÇÕES

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos alimentadores, com e sem a presença de geração distribuída, foram realizadas uma série de simulações em regime permanente e transitório. A seguir apresentam-se as principais simulações, com uma análise individualizada sobre o comportamento do sistema para cada evento avaliado.

Foram feitas simulações apenas para a condição de carga máxima do transformador (período de ponta). Para esta situação o sistema está com 42 [kVA] de potência aparente e com fator de potência de 0,82.

##### 4.1 – Condições em regime permanente

Para este caso foram realizadas simulações do sistema citado anteriormente com a entrada da geração distribuída após um determinado tempo. As figuras de 2 a 6 apresentam os valores de tensão, corrente e potências ativa e reativa quando a geração distribuída é inserida no sistema. A fonte geradora é conectada no sistema de distribuição após 150 ciclos de

funcionamento, ou 2,5 segundos. Nas figuras, a geração síncrona é representada pela sigla GS, a geração por gerador de indução é representado por GI e a fonte (geração) dc mais inversor por GDC.

Como mostra a figura 2, no ponto de conexão da geração distribuída ocorreu uma melhoria no perfil de tensão, passando de 0,942 [pu] para 0,978 [pu] no caso do GDC, 0,965 [pu] para o GS e 0,959 [pu] para o GI. Observa-se que a entrada GDC fez subir o nível de tensão mais que o GS devido a este fornecer mais potência reativa. O GI teve o pior desempenho devido a este não fornecer potência reativa.

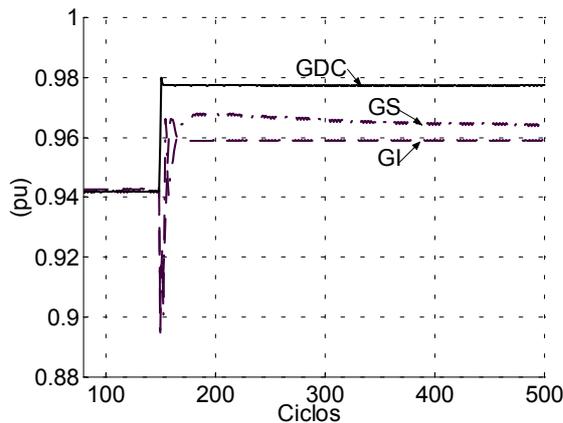


Figura 2: Tensão no ponto de conexão da geração distribuída

Os mesmos comentários da figura 2 servem para a figura 3, porém, observa-se que a melhoria do perfil de tensão é mais acentuada no ponto de conexão da geração distribuída do que no trafo. Isto demonstra que a influência da geração distribuída no sistema é local, devido ao seu pequeno porte.

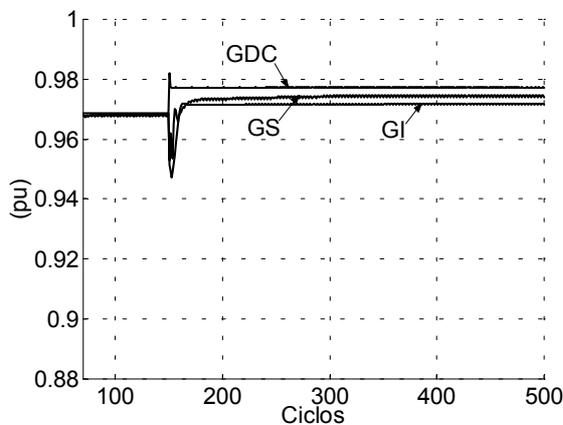


Figura 3: Tensão no transformador

Na figura 4 observa-se uma redução da corrente fornecida pelo transformador com a entrada dos geradores. Esta passou de 113,5 [A] quando a geração distribuída estava desconectada, para 92 [A] na entrada do GDC, 94 [A] para o GS e 98 [A] para o GI.

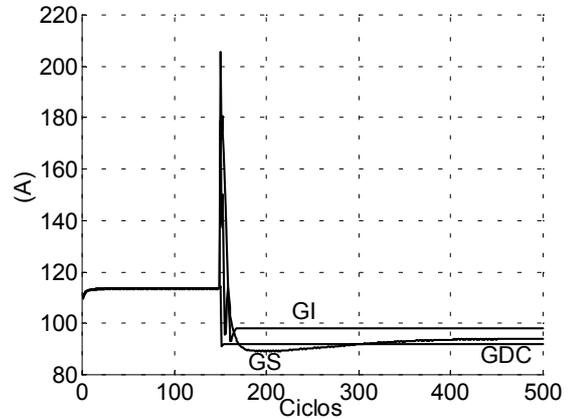


Figura 4: Corrente no transformador

No caso da potência reativa, como mostra a figura 5, o transformador estava fornecendo 23,5 [kVAr] antes da entrada dos geradores e passou a fornecer 24 [kVAr] para o GI, 21,5 [kVAr] para o GS e 20,3 [kVAr] para o GDC.

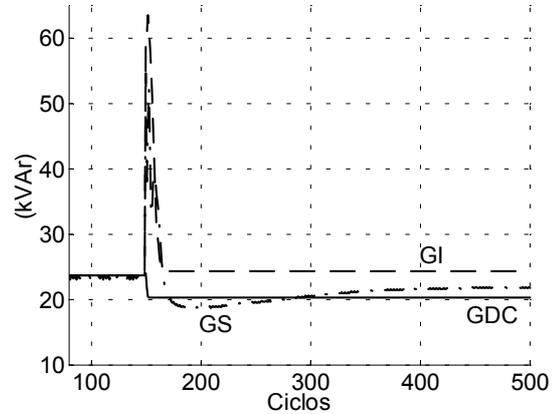


Figura 5: Potência reativa fornecida pelo transformador

Quanto à potência ativa (figura 6), o transformador estava fornecendo 34,5 [kW] antes da conexão e passou a fornecer 27 [kW] após a entrada dos geradores. Para qualquer um dos geradores a potência ativa fornecida por estes foi a mesma. Observa-se que ambos GS e GDC estão fornecendo potências ativa e reativa para o sistema e o GI está fornecendo apenas potência ativa.

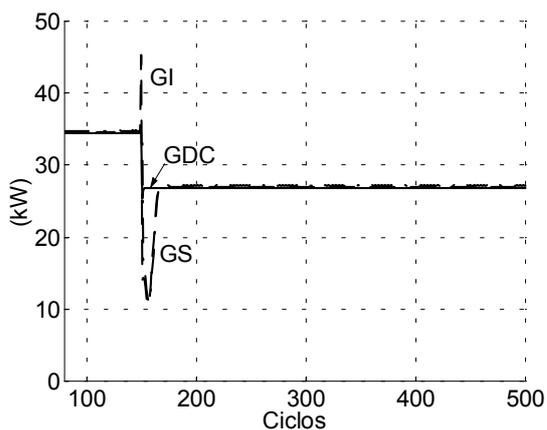


Figura 6: Potência ativa fornecida pelo transformador

#### 4.2 – Condição em regime transitório (curto circuito)

Para este caso foi inserido um curto circuito trifásico com duração de 200 ms ou 12 ciclos na barra onde está conectada a carga 6 do sistema representado na figura 1. As figuras 7 e 8 apresentam os valores das tensões e correntes dos geradores durante o curto.

Como mostra a figura 7, no momento do curto, para o gerador síncrono a tensão não cai totalmente para zero devido a este possuir uma tensão interna (excitação) independente do sistema. Para o gerador de indução, a tensão caiu para zero, pois sua excitação é proporcional à tensão do barramento, e no final do curto ocorreu um pico de tensão de 2,2 [pu] devido à influência do capacitor utilizado para a compensação de reativo. No caso da fonte dc mais inversor, a tensão cai imediatamente para zero, pois sua tensão de referência, a qual é a do sistema, também é zero.

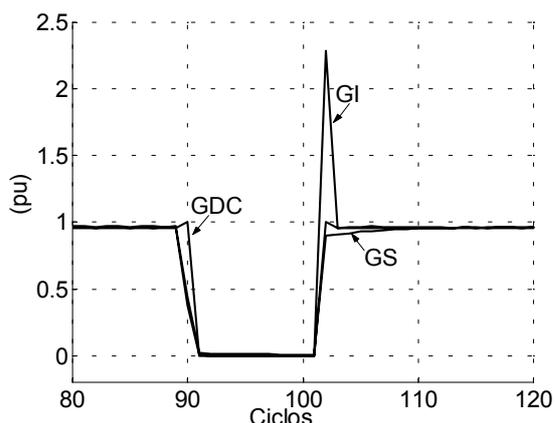


Figura 7: Tensão nos geradores durante um curto circuito

Analisando a figura 8, o gerador de indução praticamente não contribui para o curto circuito no sistema. Quando ocorre a falta trifásica, a corrente inicial de falta assume um valor em torno de seis vezes a corrente nominal a plena carga

do gerador, caindo para zero durante o período do curto. Quando ocorre uma queda de tensão, o reativo absorvido por esta máquina tende a cessar, fazendo com que o gerador de indução fique fora de operação. Com a extinção do curto, a corrente sofre um pico atingindo um valor de 16 [pu], devido à influência do capacitor.

O gerador síncrono (figura 8) contribui substancialmente para o curto circuito. Sua corrente nominal aumenta em torno de 6 vezes e se mantém durante todo o curto com uma leve queda.

O gerador dc mais inversor (figura 8) não contribui para o curto, pois, neste momento, como a tensão da rede, a qual foi adotada como referência, caiu para zero, ele praticamente se desconecta do sistema.

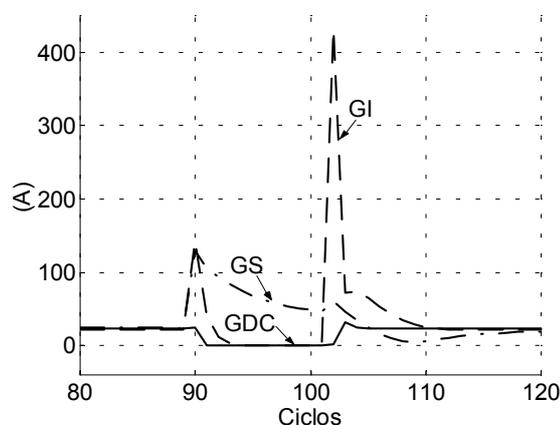


Figura 8: Corrente nos geradores durante o curto circuito

## 5 – APÊNDICES

Tabela 5: Parâmetros elétricos do gerador síncrono

Pot MVA	J kgm <sup>2</sup>	X'd pu	Xd pu	Xq pu	X''d pu	X''q pu
9,0	0,07	0,248	1,225	1,133	0,184	0,243

Tabela 6: Parâmetros elétricos do gerador de indução

Pot HP	J kgm <sup>2</sup>	R <sub>s</sub> Ω	R'r Ω	X <sub>s</sub> Ω	X'r Ω	X <sub>m</sub> Ω
10	0,07	0,39	0,507	1,091	1,1	33,96

Tabela 5: Parâmetros elétricos da fonte dc mais inversor

Pot [kVA]	Vdc [V]	Frequência de chav.[Hz]
9,0	400	5940

## 6 – CONCLUSÕES

Analisando a condição de regime permanente, observa-se que a melhora no perfil da tensão foi mais acentuada para o gerador síncrono e fonte dc mais inversor. Isto ocorre devido estarem fornecendo potências ativa e reativa para a rede de distribuição, enquanto que o gerador de indução associado com o banco de capacitores fornece apenas potência ativa. Constatou-se

também que este tipo de geração proporciona uma melhora mais acentuada para o perfil de tensão no ponto de acoplamento da geração distribuída e propicia uma leve equalização na tensão em todo o sistema.

Para a condição de curto circuito, o gerador síncrono foi o único que o alimentou durante todo o período em que este ocorreu. Para o gerador de indução, o problema ocorreu no momento de extinção do curto, quando a corrente sofreu uma elevação de 16 vezes devido ao banco de capacitores.

Comparando os tipos de gerações utilizadas, a máquina de indução apresenta vantagens em relação à síncrona devido a sua robustez, preço e a reinserção automática no sistema devido a esta não precisar ser sincronizada com a rede. Quanto à fonte dc mais inversor, este por possuir controle eletrônico, tem a vantagem de ter uma resposta mais rápida a qualquer distúrbio sofrido no sistema.

Assim, em uma análise geral, a geração distribuída, devido a seu pequeno porte, pouco interfere no perfil do sistema mas é de grande importância no contexto de alívio dos transformadores redução de perdas nos cabos e fornecimento local de reativos.

Sob o enfoque social e ambiental, este tipo de geração de energia elétrica atua diretamente no desenvolvimento da região gerando empregos e aproveitando melhor os potenciais locais como o sol, o vento, pequenas quedas d'água, os gases produzidos pelo lixo coletado nas cidades, restos de madeiras e o bagaço de cana das usinas de álcool e açúcar.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.H. Lasseter, *Control of distributed resources*, in: L. H. Fink, C.D. Vournas (Eds.), *Proceedings: Bulk Power Systems Dynamics and Control IV, Restructuring*, organised by IREP and National Technical University of Athens, Santorini, Greece, August 23–28, 1998, pp. 323–329.
- [2] M. Grubb, *Renewable Energy Strategies for Europe*-Volume I, *Foundations and Context*, The Royal Institute of International Affairs, London, UK, 1995.
- [3] C. L. Sousa, L. M. Neto, G. C. Guimarães, A. J. Moraes, *O uso de geradores de indução na melhoria da estabilidade de um sistema*. *Eletricidade Moderna*, março de 2000, pág. 84 – 96.
- [4] J. C. Nonato, M. M. Severino. *Faturamento de Energia Reativa em Condomínios Residenciais*. *Eletricidade Moderna*, fevereiro de 1998, pág 60 – 67.
- [5] E. L. Soares, “*Uma Investigação dos Consumidores Residenciais Sob o Enfoque da Qualidade de Energia Elétrica*”. Dissertação de Mestrado – UFU Março, 1999.
- [6] SABER Reference Manual, Release 5.1, Analogy Inc., Beaverton, OR, 1999.