

PROPOSTA DE MODELAGEM DE CONDICIONADOR DE AR INVERTER, VISANDO ESTUDOS DE DESEMPENHO FRENTE A DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Vinícius. F. Bossa, Carlos. E. Tavares, Paulo. H. O. Rezende, Isaque. N. Gondim

Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT, Uberlândia, Brasil
E-mail: bossa.engenhariaeletrica@gmail.com, cetavares@eel.ufu.br

Resumo - O objetivo deste trabalho se fundamenta na proposta de modelagem de um equipamento condicionador de ar que utiliza um inversor de frequência para acionamento e controle de velocidade do motor do compressor hermético. Para tal finalidade, utilizou-se métodos de modelagem no domínio do tempo em consonância com os termos requeridos pelo simulador computacional Alternative Transients Program (ATP).

Palavras-Chave – ATP, Condicionador de Ar Inverter, Qualidade de Energia Elétrica.

PROPOSED MODEL FOR THE INVERTER AIR CONDITIONER, AIMING PERFORMANCE STUDIES UNDER POWER QUALITY DISTURBANCES

Abstract - This work is based on the proposed model for the air conditioner equipment that uses a frequency inverter for powering and controlling the motor speed hermetic compressor. For this purpose, are used modeling methods in the time domain to match the terms required by ATP simulator.

Keywords - ATP, Inverter Air Conditioner, Computational Modeling, Power Quality.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a energia elétrica de suprimento, tem apresentado características diferentes daquelas consideradas ideais. Isto se deve, principalmente, ao aumento do número de cargas com características não lineares e à complexa dinâmica de operações do sistema interligado, compreendendo a entrada e saída de grandes cargas, os mais diversos chaveamentos e energizações, além das possíveis contingências. Estas condições podem, por vezes, comprometer o adequado funcionamento de equipamentos eletroeletrônicos e afetar a sua integridade física, notadamente aqueles dotados de tecnologia mais moderna, que utilizam a eletrônica de potência e, geralmente, são mais sensíveis à qualidade da tensão de suprimento [1].

Diante destes aspectos, tem-se observado nos últimos anos um incremento de pedidos de ressarcimento feitos por consumidores às concessionárias de energia, associados aos danos em dispositivos eletroeletrônicos, possivelmente ocasionados pelos problemas na qualidade da energia elétrica de suprimento [2].

De acordo com informações de concessionárias, os aparelhos eletroeletrônicos, que detêm a eletrônica de potência embarcada para adequar a alimentação a rede elétrica aos seus circuitos internos, estão se transformando em um motivo de grande preocupação devido ao seu custo financeiro e ao número crescente de pedidos de indenização pelos danos nos mesmos.

Uma das aplicações mais recentes da eletrônica de potência em equipamentos eletroeletrônicos está presente na nova geração de aparelhos de ar condicionado Split. Tais produtos são conhecidos por condicionadores de ar do tipo Inverter. Estes utilizam um retificador para acoplamento da rede elétrica com um inversor de frequência para variação de velocidade do motor da unidade condensadora, conforme a necessidade de refrigeração do ambiente. Esta topologia permite a capacidade de se atingir a temperatura desejada rapidamente e mantê-la constante, com pouca oscilação de energia. A economia obtida por este equipamento gira em torno de 40% se comparado com o seu antecessor Split [3]. O nível de ruído do aparelho inverter também é menor se comparado aos aparelhos tradicionais. Isso ocorre devido ao sistema de operação interno, que habilita o compressor a operar em baixa rotação quando a temperatura fica estabilizada, reduzindo potencialmente o ruído. Tais atributos estão fazendo com que este equipamento assuma grande parcela nas aplicações residenciais e comerciais e, conseqüentemente, se apresentem como uma parcela significativa nos sistemas de energia elétrica [3]

No intuito de analisar o relacionamento entre um dano reivindicado e um dado distúrbio na tensão, a utilização de ferramentas computacionais surge como uma aproximação promissora. Geralmente, esta estratégia compreende as seguintes etapas: modelo do equipamento, implementação computacional do dispositivo e do sistema elétrico de suprimento no domínio do tempo, validação dos modelos obtidos perante ensaios laboratoriais, e finalmente, a comparação entre a suportabilidade do equipamento e os impactos dos distúrbios na tensão de suprimento aplicada nos terminais do produto investigado [4].

Diante destas circunstâncias este trabalho apresenta a modelagem de um equipamento Condicionador de Ar que utiliza o inversor de frequência como acionamento do motor trifásico do compressor. Além da modelagem do equipamento Inverter através do simulador ATP, esta



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

proposta aborda a validação experimental em ambiente laboratorial, a fim de concretizar os resultados computacionais e reais sob condições de alimentação ideal e não ideal.

II. O AR CONDICIONADO INVERTER

A principal diferença do ar condicionado Inverter com o ar Split convencional, é que o Inverter possui em seu sistema de acionamento um inversor de frequência que torna possível atingir a temperatura desejada rapidamente, além de mantê-la praticamente constante.

A operação do compressor varia em função da operação desejada, sendo que a rotação do motor varia gradativamente pra manter a temperatura definida. Dessa forma, evitam-se os vários acionamentos do motor e por consequência, correntes elevadas de partida. O nível de ruído é consideravelmente menor do que equipamentos semelhantes que não possuem este sistema de acionamento. O inversor habilita o compressor a operar em baixa rotação quando a temperatura desejada se estabiliza. Além disso, este equipamento utiliza o gás ecológico R-410A, que não emite CFC, causador de agressões na camada de Ozônio.

III. ESTRATÉGIA PARA A MODELAGEM DO AR CONDICIONADO INVERTER

Para obter o modelo computacional representativo do equipamento supracitado é de extrema importância que uma metodologia seja seguida, de modo a considerar os aspectos teóricos e práticos que o assunto exige. Sendo assim, os seguintes procedimentos foram seguidos:

- Análise e identificação da estrutura física das partes elétricas e mecânicas dos equipamentos de ar condicionado que utiliza o inversor de frequência para acionamento do motor do compressor;
- Levantamento das bases físicas necessárias para a representação do equipamento supracitado através de um modelo equivalente;
- Modelagem e implementação computacional do equipamento no simulador ATP, que utiliza técnicas de estudos no domínio do tempo;
- Validação da modelagem computacional através de ensaios experimentais em laboratório que confrontam os dois resultados obtidos para a mesma situação de alimentação;
- Teste do modelo computacional do equipamento submetido a distúrbios da qualidade da energia elétrica.

A. Modelagem da evaporadora

De acordo com pesquisas realizadas relacionadas a suportabilidade térmica e dielétrica da unidade evaporadora, ficou claro que os limites estão estritamente relacionados a placa eletrônica desta unidade pois, confirmou-se que quase a totalidade dos problemas que possuem relação com distúrbios na qualidade de energia elétrica, resulta em danos físicos nesta placa eletrônica [5]. Segundo as medições em laboratório e inspeção visual dos componentes da placa, verificou-se que a mesma poderia ser representada por uma

ponte retificadora de onda completa não controlada, e um capacitor em paralelo para a atenuação do *ripple* de tensão na saída desde retificador.

O bloco representativo da unidade em questão bem como seu circuito equivalente no ATP, está representado na Figura 1.

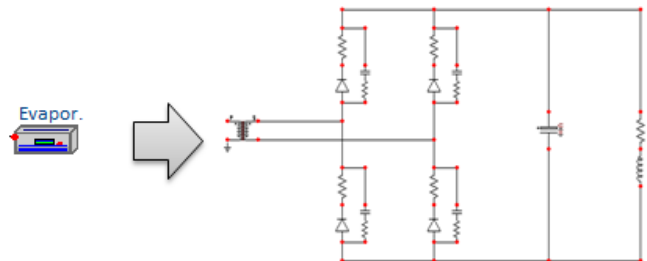


Figura 1. Bloco representativo da evaporadora no ATP.

B. Modelagem da Condensadora

O principal componente da unidade condensadora com relação ao carregamento de corrente é o compressor hermético, sendo basicamente constituído do motor trifásico. Assim, foi dado ênfase à modelagem computacional deste motor.

De posse das informações de funcionamento e características do motor trifásico, foi utilizado o modelo de máquina de indução assíncrona alimentada por três fases disponibilizada na biblioteca do ATP.

Os dados utilizados para a modelagem do motor foram obtidos de um motor trifásico de 1CV da linha padrão de um fabricante nacional, pelo motivo de grande parte de condicionadores de ar inverter de 9.000 Btu/h utilizarem semelhantes potências de motor para acionamento do compressor. Os dados do catálogo são expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados do Motor Trifásico

MIT - Linha Padrão	
Potência	1 [CV]
Frequência nominal	60 [Hz]
Velocidade	3425 [RPM]
Corrente nominal	3,0 [A]
Corrente com rotor bloqueado (I_p/I_n)	7,2
Conjugado nominal	0,21 [Kgfm]
Rendimento (100% da potência nominal)	77,1%
Momento de inércia	0,00052 [Kg m^2]

O bloco representativo da unidade em questão no ATP, bem como o seu circuito equivalente está representado na Figura 2.

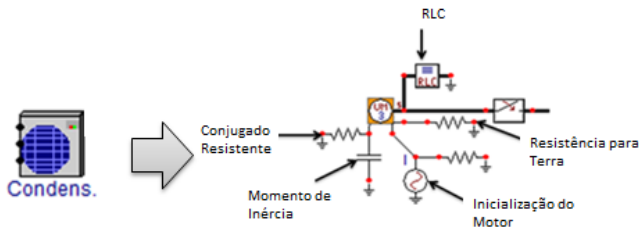


Figura 2. Bloco representativo da unidade condensadora no ATP

C. Modelagem do Inversor de Frequência

A utilização de inversores de frequência atualmente compreende o método mais utilizado para controlar a velocidade de motores de indução. De forma sucinta, os inversores transformam a tensão da rede de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Com a variação da frequência da tensão de alimentação de uma máquina, varia-se por consequência a velocidade do campo girante e por sua vez a velocidade mecânica de rotação do rotor.

O inversor estático de frequência é composto por uma ponte retificadora, um elo CC e Transistores Bipolar de Porta Isolada (IGBT's), que são responsáveis pela inversão da tensão contínua em um sinal alternado com tensão e frequência variáveis. A topologia construtiva do equipamento em questão é mostrada na Figura 3.

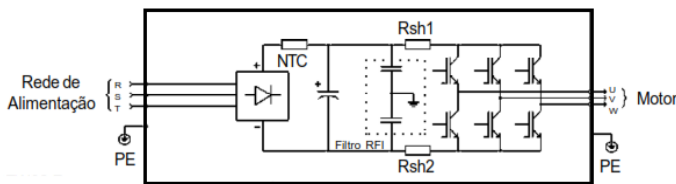


Figura 3. Arranjo do Inversor de Frequência [4].

O arranjo mostrado na figura anterior compreende as seguintes unidades básicas:

- Retificador: constitui-se de uma ponte retificadora não controlada, cuja saída alimenta o elo CC;
- Elo CC: contém um filtro capacitivo com o objetivo de manter o "ripple" da onda reduzido, mesmo na ocorrência de distúrbios no lado CA;
- Inversor: consiste de uma ponte inversora trifásica controlada. Permite a variação da tensão CA em amplitude e frequência, alterando dessa maneira a velocidade de rotação do rotor;
- Circuito de controle de disparo: é a unidade responsável pela abertura e fechamento das chaves semicondutoras do inversor, utiliza-se a técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM).

De posse dessas informações utilizou-se o recurso *MODELS* do ATP para a modelagem do equipamento em questão. Para tal finalidade, o inversor foi feito em blocos testados separadamente para obter um resultado fiel ao equipamento real. A Figura 4 apresenta as partes interligadas do inversor.

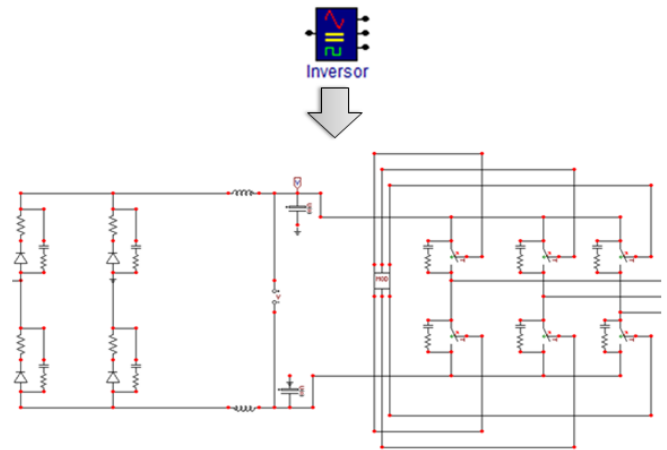


Figura 4. Bloco representativo do Inversor de Frequência Estático.

Considerando o desenvolvimento do circuito até o momento, a Figura 5 ilustra os blocos, evaporadora, inversor de frequência estático e a condensadora, contemplando o Ar condicionado Inverter completo. Além destas unidades evidencia-se a presença do bloco denominado "Medidor", que possui o objetivo de fornecer os valores eficazes de tensão, corrente total, potência e fator de potência do circuito.

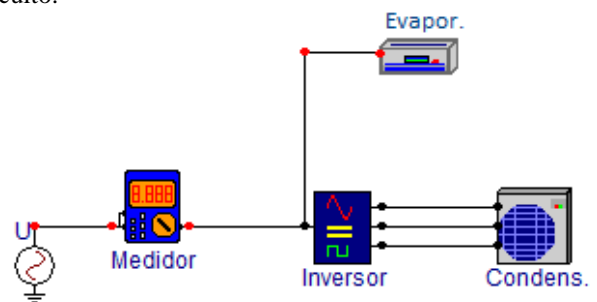


Figura 5. Representação do Ar Inverter no ATP.

IV. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR INVERTER

Ao término da seção anterior, chegou-se a modelagem do equipamento condicionador de Ar Inverter através de uma topologia que permite a avaliação de seu desempenho sob condições ideais e não ideais de alimentação. Para tal finalidade, optou-se por analisar e correlacionar de forma direta os resultados obtidos para as tensões e respectivas correntes na entrada do equipamento em estudo, o qual é representado por um inversor de frequência alimentado por duas fases da rede de distribuição local.

A. Alimentação com tensão de suprimento Ideal

Este estudo objetiva a análise comparativa das formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento quando condições nominais de operação. A indisponibilidade de um equipamento para os testes práticos de desempenho culminou na utilização dos dados mostrados na referência [3]. Desta forma, os resultados obtidos permitirão o estabelecimento de uma condição de referência necessária para a aquisição de uma base de dados. Na mencionada

referência foi realizada uma medição de tensão e corrente na entrada de um equipamento real de condicionamento de ar com tecnologia inverter, cujas características são as mesmas consideradas no modelo computacional proposto neste trabalho. Neste sentido, as figuras 5 e 6 evidenciam, respectivamente, os resultados provenientes de medição em equipamento real (referência [3]) e no modelo computacional obtido neste trabalho.

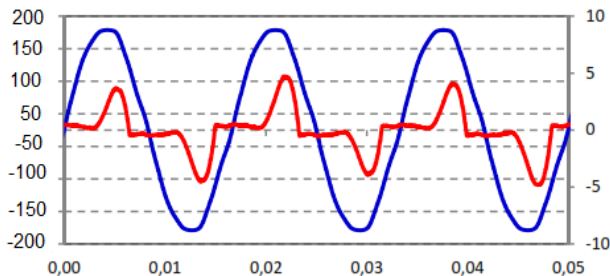


Figura 5. Tensão de alimentação e corrente na entrada do equipamento - Medição [3].

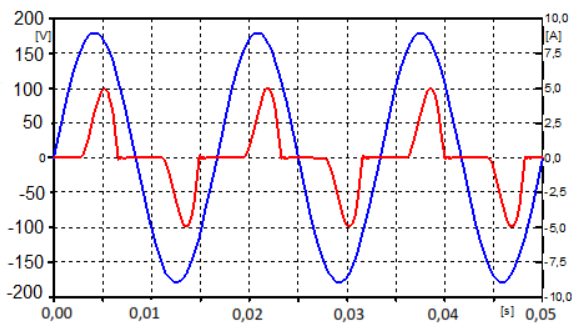


Figura 6. Tensão de alimentação e corrente na entrada do equipamento - Computacional.

As Figuras 7 e 8 fornecem o espectro de frequências das formas de onda da corrente, fornecendo as componentes de distorção harmônica presentes na corrente solicitada pelo equipamento. A Figura 7 mostra o espectro obtido na referência [3] e a Figura 8 o espectro resultante da corrente solicitada pelo modelo computacional proposto neste Trabalho. Nota-se que a corrente de alimentação é altamente não senoidal devido ao emprego de retificador não controlado de diodos no circuito de entrada do equipamento.

As ordens pares verificadas na medição do equipamento real (Figura 7) se justificam pelas questões de não simetria na construção do motor elétrico e pequena distorção na tensão de alimentação [3].

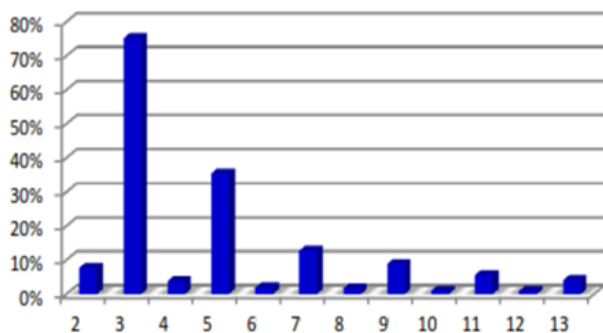


Figura 7. Espectro Harmônico de corrente - Medição [3].

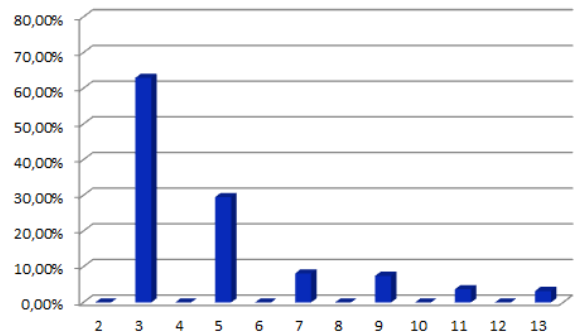


Figura 8. Espectro harmônico de corrente - Computacional.

Verifica-se, pela análise das figuras anteriores, que há uma boa semelhança entre os desempenhos obtidos permitindo que o modelo computacional possa ser avaliado nas situações de alimentação não ideal.

B. Alimentação com tensão de suprimento não Ideal

Neste particular, ressalta-se que a indisponibilidade do produto real para testes determinou a opção por representá-lo, experimentalmente, através de um inversor de frequência comercial que possui a possibilidade de ser alimentado por duas fases (L1 e L2) tendo sua saída composta por três fases (U, V e W), sendo, portanto, semelhante à topologia adotada nos equipamentos Inverter. Isto permitiu verificar o comportamento do circuito de potência do aparelho enfocado. Destaca-se que os resultados experimentais deste arranjo, similar ao produto enfocado, para condições de alimentação senoidal foram semelhantes aos apresentados na seção anterior e, por isso, foram omitidos neste trabalho por limitações de espaço. Também por este motivo, serão mostrados os resultados para afundamentos de tensão e elevações de tensão, por serem os distúrbios mais severos.

1) Estrutura laboratorial para realização dos ensaios experimentais

A Figura 9 ilustra o arranjo físico dos equipamentos para a realização dos testes.

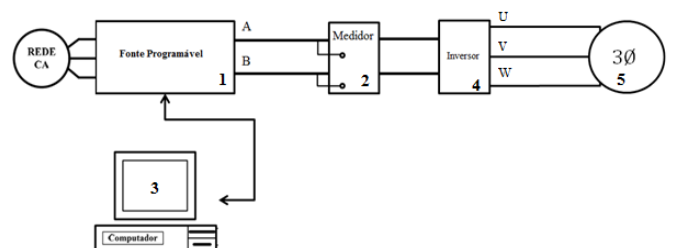


Figura 9. Esquema de ligação para testes.

Para a topologia mostrada na figura anterior, têm-se os seguintes equipamentos para aplicação dos distúrbios e aquisição das formas de onda:

1. Fonte programável trifásica com potência nominal de 4,5 KVA. A fonte permite a aplicação sinais de tensão puramente senoidal e aplicação de distúrbios

relacionados à qualidade de energia elétrica de forma controlada.

2. Medidor;
3. Microcomputador para controle da fonte programável;
4. Inversor de Frequência;
5. Motor trifásico.

A Figura 10 ilustra a montagem realizada em laboratório.

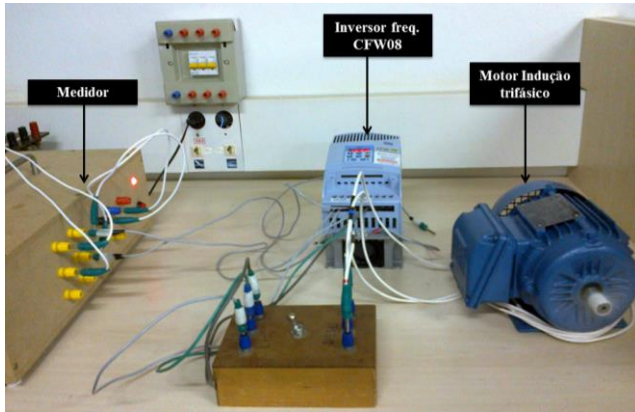


Figura 10. Montagem para experimentos em laboratório.

Como forma de apresentação dos resultados obtidos padronizou-se mostrar primeiramente os resultados experimentais e em seguida os resultados referentes à modelagem computacional. Utilizou-se também a cor azul para a forma de onda da tensão e a cor vermelha para a forma de onda da corrente.

2) Suprimento contendo afundamento de tensão de Curta Duração

O fenômeno de afundamento de tensão (“voltage sag”) pode ser definido como o decréscimo entre 0,1 a 0,9 pu do valor nominal da tensão, com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto. Este tipo de variação está relacionado principalmente às faltas no sistema elétrico, bem como partidas de grandes motores ou energização de cargas pesadas.

Os resultados a seguir ilustram o comportamento experimental e computacional do Condicionador de Ar para um afundamento para 90% da tensão nominal com duração de 15 ciclos. Os oscilogramas das respectivas Figuras 11 e 12 foram capturados no ponto de conexão do arranjo representativo do equipamento com a fonte de alimentação.

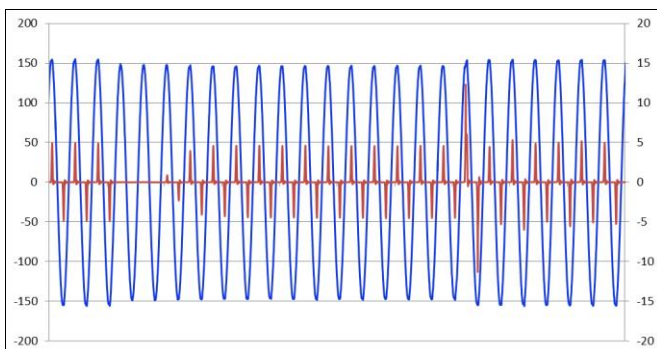


Figura 11. Tensão de alimentação e corrente na entrada do equipamento durante o afundamento – Experimental.

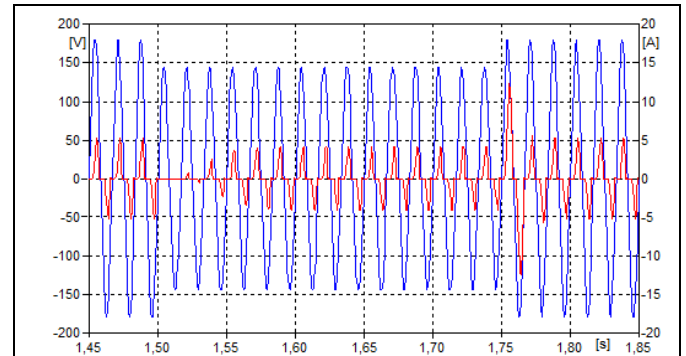


Figura 12. Tensão de alimentação e corrente na entrada do equipamento durante o afundamento – Computacional.

Com a finalidade de contemplar as análises feitas sob influência do afundamento de tensão na saída o inversor, ou seja, entre o inversor e o motor, foram realizadas medições nesta parte do circuito. Nesta etapa optou-se por aplicar um afundamento de tensão para 60% da tensão nominal na entrada do circuito, devido à severidade do evento, pode-se observar de forma mais clara os seus consequentes efeitos. As Figuras 13 e 14 mostram as implicações na corrente proveniente do afundamento de tensão supracitado.

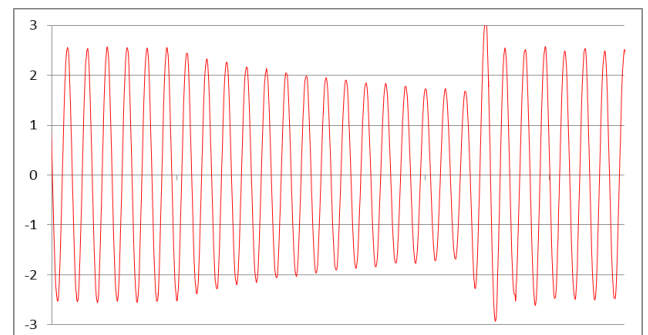


Figura 13. Corrente na saída do inversor durante o afundamento – Experimental

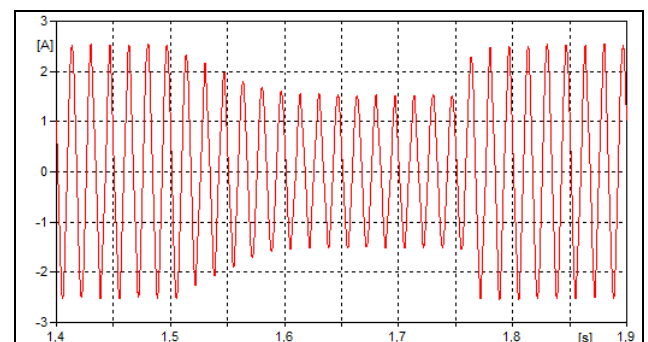


Figura 14. Corrente na saída do inversor durante o afundamento – Computacional

Verifica-se que há uma boa semelhança entre os resultados obtidos por ambos os métodos.

Considerando as Figuras 11 e 12, observa-se que no início do afundamento de tensão, a corrente requisitada se torna nula, isso ocorre porque a tensão da rede é menor que a tensão armazenada no capacitor, dessa forma os diodos da ponte retificadora ficam reversamente polarizados bloqueando o fluxo de corrente na entrada do equipamento.

Neste ponto, quando o capacitor se descarrega, há o reestabelecimento da alimentação pela rede, porém ainda sob o efeito do afundamento da tensão. A partir do instante em que as condições anormais de alimentação são interrompidas verifica-se um pico de corrente devido o carregamento do capacitor. Estes níveis de corrente podem fazer com que a proteção do equipamento atue.

3) Suprimento contendo elevação de tensão de curta duração

Este item tem por objetivo verificar o comportamento do Ar Condicionado, quando este é submetido à elevação de tensão (“voltage swell”) para 120% da tensão nominal, com duração de 15 ciclos.

Os resultados experimentais e o advindo do modelo computacional são mostrados nas Figuras 15 e 16 a seguir.

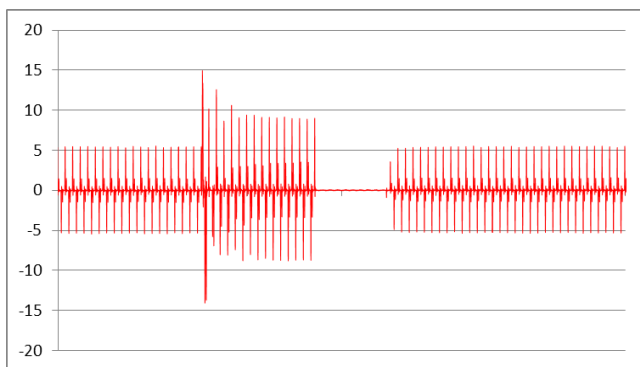


Figura 15. Corrente na entrada do equipamento durante a elevação – Experimental.

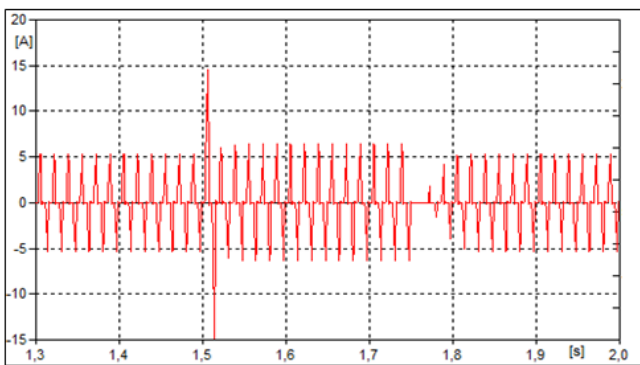


Figura 16. Corrente na entrada do equipamento durante a elevação – Computacional.

Percebe-se que este distúrbio causa um incremento de corrente no instante inicial. Os resultados se mostram coesos para ambos os métodos utilizados, comprovando-se a eficácia do modelo computacional.

Semelhante à análise sobre o afundamento de tensão, no momento em que ocorre a elevação, o capacitor recebe mais carga, o que causa um aumento instantâneo de corrente com duração de um ciclo. Quando o valor da tensão aplicada volta para a condição nominal, o capacitor se descarrega impedindo a alimentação pela fonte, pois os diodos da ponte retificadora estão reversamente polarizados neste instante. No momento em que o capacitor descarrega até atingir o valor nominal, a corrente passa a fluir no sentido da fonte para a carga.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a modelagem das principais partes constituintes do Condicionador de Ar com tecnologia *inverter*. Em um primeiro momento discorreu-se sobre a estratégia de abordagem para a devida representação do equipamento no software de simulação ATP. Não obstante a falta de um equipamento para os testes experimentais de validação do modelo computacional, a partir do conhecimento de sua topologia e de suas características operacionais, um arranjo similar foi elaborado e montado, obtendo as mesmas características do equipamento comercial. Neste contexto, foram descritos o arranjo realizado em laboratório bem como os principais equipamentos utilizados, através do qual foi possível a realização de testes com suprimento ideal e não ideal.

A análise do desempenho experimental e computacional do equipamento em estudo se baseou nas principais grandezas passíveis de medição em laboratório. Em cada caso analisado foram consideradas as tensões e suas respectivas correntes.

Verificou-se uma boa aderência entre a representação do circuito na plataforma ATP com a topologia adotada para representação do Condicionador de Ar Inverter, uma vez que os resultados e fenômenos associados à alimentação ideal e não ideal se mostraram bastante semelhantes, inclusive para outros distúrbios que não foram apresentados neste artigo por falta de espaço. As pequenas discrepâncias observadas podem ser facilmente ajustadas quando da disponibilidade do produto real para os testes laboratoriais de desempenho.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan., S. Santoso., H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd Edition. USA: McGraw-Hill, 2003.
- [2] A. S. Jucá, “*Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação*”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 2003.
- [3] Rezende P. H. O. ; TAVARES, Carlos Eduardo; OLIVEIRA, J. C “*Uma Análise Comparativa de Condicionadores de Ar no contexto da Qualidade e da Racionalização da Energia Elétrica*”; X Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Araxá-MG, 2013;
- [4] GONDIM, I. N.; TAVARES, C. E.; MENDONÇA, M. V. B.; OLIVEIRA, J. C.; RODRIGUES, K. D.; SILVA, R. M. T.; “*Modelagem e Análise de Desempenho de Fontes Chaveadas sob Condições Não-Ideais de Alimentação na Plataforma ATP*”. V CEEL – Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, 2007.
- [5] REZENDE P.H. O., “*Uma Proposta de Modelagem de Condicionadores de Ar Split Visando a Análise de Pedidos de Ressarcimento por Danos Elétricos*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia/MG. 2012.