



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102015028640-6

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102015028640-6

(22) Data do Depósito: 13/11/2015

(43) Data da Publicação Nacional: 23/05/2017

(51) Classificação Internacional: H02J 13/00; G01R 27/02; H02H 3/12.

(54) Título: SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 25648387000118. Endereço: Av. João Naves de Ávila, nº 2160 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia, MG, BRASIL(BR), 38400-902; CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A., Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 06981180000116. Endereço: AV. BARBACENA, 1.200/17º ANDAR - ALA 01 - BAIRRO SANTO AGOSTINHO, BELO HORIZONTE, MG, BRASIL(BR), 30190-131

(72) Inventor: MILTON ITSUO SAMESIMA; JOSÉ WILSON RESENDE; JOSÉ RUBENS MACEDO JÚNIOR; ALOISIO DE OLIVEIRA; JONMIL MARQUES BORGES; JOSÉ VALTEIR DE ARAÚJO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 13/11/2015, observadas as condições legais

Expedida em: 28/02/2023

Assinado digitalmente por:

Alexandre Dantas Rodrigues

Diretor Substituto de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

**“SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA
CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS”**

[01] A presente patente de invenção é aplicada na área de distribuição e captação de energia elétrica e refere-se a sistema utilizado na implementação de análise de conteúdo de inter-harmônica da corrente de falta.

[02] A análise dos desequilíbrios de corrente é empregada em faltas assimétricas, pois, nestas ocorrências, tanto a corrente quanto a tensão ficam desequilibradas. Quando um cabo de energia se parte e cai ao solo, por exemplo, advém uma falta de alta impedância, caracterizada como uma falta assimétrica. Como a corrente é pequena, as proteções convencionais não operam. Entretanto, um dispositivo que interprete esse desequilíbrio é capaz de detectar esta falta.

[03] As cargas do circuito e o próprio arranjo da rede também podem proporcionar desequilíbrios de corrente. Assim, é necessário conhecer os desequilíbrios originados pela falta de alta impedância para definir adequadamente os ajustes.

[04] Por sua vez, a análise do conteúdo de inter-harmônicas ou o estudo da forma de onda de corrente e seu respectivo espectro de frequências está associada ao arco elétrico produzido nos curtos-circuitos das redes elétricas de distribuição. Nesta análise foi desenvolvido o presente sistema que descreve o arco elétrico ao ar livre, evidenciando as inter-harmônicas características desta ocorrência.

[05] Há muito tempo se almejam soluções que sejam capazes de detectar faltas de alta impedância tendo em vista que os sistemas convencionais de controle das proteções baseados em sobrecorrente, impedância ou outros princípios largamente empregados não detectam tais falhas, bem como ser seus efeitos podem extremamente nocivos. Além de perdas materiais, eventos deste gênero podem causar acidentes gravíssimos, até mesmo fatais, junto à população e animais.

[06] Os sistemas de proteção convencionais são adequados para a detecção de faltas de impedância moderadamente baixa, que possuem correntes relativamente elevadas. As faltas de alta impedância apresentam correntes da

mesma ordem de grandeza das correntes de carga, geralmente associadas a arco voltaico, sendo imperceptíveis à proteção convencional.

[07] Quando da ocorrência de fenômenos manifestados na forma final de um cabo caindo fisicamente e estabelecendo contato com a terra, tem-se, como são comumente chamadas, as denominadas faltas Fase-Terra. Em tese, isto deveria resultar numa corrente expressiva o suficiente para atuar os dispositivos de proteção e, sequencialmente, via operação dos mesmos, tal cabo e respectivo alimentador seriam desenergizados.

[08] Todavia, para muitas situações, o condutor que estabeleceu contato com a terra o faz via meios físicos que não ocasionam a esperada corrente e, nestas circunstâncias, a exemplo do que poderia ocorrer caso o contato ocorra sob uma superfície semi-isolada (como um piso de asfalto, cimento, brita, areia, etc.), ou outro meio que proporcione uma alta resistividade, poderá produzir uma corrente não detectável pelos dispositivos de proteção tradicionalmente existentes e ajustados. De fato, nestas condições, a corrente, durante o curto-circuito em pauta, torna-se muito pequena e as técnicas convencionais utilizadas nos projetos de relés, que são baseadas na amplitude da corrente, tornam-se ineficazes.

[09] Assim sendo, o cabo mantém-se energizado em alta ou média tensão e, diante desta realidade, uma série de riscos poderá advir, sendo a vida humana a maior preocupação, visto que existe a possibilidade de um transeunte fazer contato com o cabo “vivo” ao seu alcance.

[010] As cargas do circuito e o próprio arranjo da rede também podem proporcionar desequilíbrios de corrente. Assim, é necessário conhecer os desequilíbrios originados pela falta de alta impedância para definir adequadamente os ajustes.

[011] Por sua vez, a análise do conteúdo de inter-harmônicas ou o estudo da forma de onda de corrente e seu respectivo espectro de frequências está associada ao arco elétrico produzido nos curtos-circuitos das redes elétricas de distribuição.

[012] Alguns estudos realizados durante o final dos anos 80 e início dos anos 90 abordam a possibilidade, assim como a factibilidade da identificação de faltas de alta impedância através da análise do espectro de frequências da

corrente associada ao arco elétrico produzido pelos curtos-circuitos nas redes elétricas de distribuição.

[013] As inter-harmônicas podem ser definidas, conforme Norma Europeia IEC 61000-2-2 [5], como quaisquer frequências múltiplas não inteiras da frequência fundamental.

[014] Fundamentalmente, o conceito associado às frequências harmônicas baseia-se na análise da Série de Fourier, a partir da qual é possível representar um determinado sinal em função de suas componentes de frequência. Em termos práticos, esta análise possibilita a reconstrução de um determinado sinal periódico não senoidal, no domínio da frequência, através de um somatório de componentes senoidais com diferentes amplitudes.

[015] A transformação de um sinal contínuo no domínio do tempo, através da série de Fourier, é uma ferramenta muito importante em vários segmentos da engenharia, porém, sua implementação computacional completa é extremamente difícil e, por certas vezes, inviável.

[016] Em geral, sabe-se que, pelo menos idealmente falando, os sistemas de energia não deveriam apresentar correntes ou tensões que não fossem as fundamentais, e de sequência positiva. Porém, sabe-se também que é muito difícil se ter um sistema perfeitamente equilibrado (com ausência de componentes de sequência zero ou negativa).

[017] Quando ocorrem faltas assimétricas em um alimentador, em geral, a rede fica desequilibrada, tanto em tensão como em corrente. Para faltas de alta impedância (FAI) em que um cabo cai no solo, mas não causa o surgimento de grande corrente, um fusível ou um relé de sobrecorrente não detectará a falta. Porém, um detector que leia o grau de desequilíbrio da corrente poderá detectar esta FAI. Esta função de proteção é classificada, pela ANSI, com o número 46. Ela tem sido implementada nos relés digitais, porém tem sido pouco ativada nos relés das empresas distribuidoras. O principal motivo disso é que, muitas vezes, o relé atua, mas não há uma FAI, e sim, um desequilíbrio na rede.

[018] Para se usar a função 46, conforme estudos e simulações realizadas, recomendável que se conheça o maior grau de desequilíbrio da rede em

condições ditas normais. Desta forma, o ajuste da função 46 deverá ser feito para um valor acima deste grau de desequilíbrio normal.

[019] O presente sistema permite a avaliação dos graus de desequilíbrios e foi criado através do desenvolvimento de sub-rotinas no programa ATP (*Alternative Transient Program*). Os desenvolvimentos realizados permitem o cálculo de índices de desequilíbrio de corrente em quaisquer condições da rede modelada.

[020] A literatura técnica especializada apresenta diferentes modelos para representação dos arcos elétricos nos sistemas de potência. Contudo, o modelo sugerido por Ayrton, apesar de se basear em metodologias empíricas, tem sido o modelo mais utilizado na representação do fenômeno. O referido modelo consiste na representação empírica do comportamento da queda de tensão no arco elétrico em função de seu comprimento e da corrente circulante, conforme mostrado na seguinte Equação:

$$\Delta V_{ARCO} = A + B.l + \frac{C.l + D}{I_{RMS}}$$

[021]

[022] A, B, C e D são constantes dependentes do material; l = comprimento do arco (em cm); I (RMS) = Corrente eficaz circulante pelo arco.

[023] Para o caso específico do arco elétrico ao ar livre, considerando-se condutores de alumínio, serão utilizados os seguintes valores para as constantes: A = 0,2; B = 0,9; C = 0,2 e D = 0,35.

[024] De acordo com a Figura 1, a implementação do modelo ao arco elétrico, com base em duração de 1s (1 segundo), foi realizada em ambiente Matlab/Simulink, conforme representação de blocos indicada no Fluxograma 1.

[025] De acordo com a Figura 2, e com base no modelo da queda de tensão no arco elétrico, utilizou-se, para os propósitos do presente relatório, o sistema elétrico elementar mostrado no Fluxograma 2, composto de geração, um trecho de rede em 13,8 kV, e finalmente, uma carga concentrada ao final do trecho.

[026] Para um tempo total de simulação (no domínio do tempo) igual a 1 segundo, foi considerado um curto-circuito fase-terra na fase C, o qual é

iniciado no instante $t = 500\text{ms}$ e possui uma duração de 100ms . Adicionalmente, foi considerada a presença de arco elétrico associado ao referido curto-circuito durante todo o tempo de duração do mesmo. Como particularidade do sistema desenvolvido, o comprimento do arco utilizado no equacionamento de Ayrton foi considerado como tendo comprimento aleatório entre 0 e 30cm.

[027] De acordo com a Figura 3, o Gráfico 1 mostra as correntes de linha do sistema ao longo de todo o intervalo de simulação. Conforme observado, entre os instantes $t = 0,5\text{s}$ e $t = 0,6\text{s}$, percebe-se claramente o efeito da não linearidade da resistência do arco associado ao curto-circuito fase-terra.

[028] Diante do exposto, a ideia central da análise é verificar a possibilidade de extração de uma assinatura digital da corrente gerada pelo arco elétrico no sistema. Tomando-se a Transformada Discreta de Fourier do sinal instantâneo da corrente de linha da fase em curto, percebe-se claramente a incidência de frequências comumente atípicas ao sistema de distribuição.

[029] Conforme Figura 4, percebe-se grande incidência de correntes com frequências inter-harmônicas na fase em curto, conforme mostrado no Gráfico 2, ilustrando o espectro de frequências da corrente de linha da fase C, durante a permanência do arco elétrico. A identificação destas frequências, a princípio, pode servir como identificador de faltas nas redes elétricas, independentemente da amplitude das correntes envolvidas.

[030] Após a modelagem, foram realizados testes simulando faltas de altas impedâncias em um sistema real de distribuição em média tensão. Construiu-se o campo de testes já mostrado na equação 1 e esquematizado na Figura 5 (estrutura da rede de média tensão utilizada para realização dos ensaios de campo), no qual foram considerados diferentes tipos de solos, a saber: terra, capim, areia, cimento, brita, asfalto e árvores.

[031] Em termos elétricos, o ramal trifásico associado ao campo de testes está localizado em um final de trecho de rede de MT, o qual por sua vez tem origem na SE (subestação) Uberlândia 1, da CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, e mais precisamente no alimentador ULA38F4 da mesma subestação.

[032] De acordo com a Figura 5, o Fluxograma 3 também ilustra a estrutura elétrica do arranjo, com destaque para os dois medidores de inter-harmônicas

instalados no próprio campo de testes, assim como na saída do alimentador ULA38F4. Deve-se ressaltar também que os referidos medidores foram sincronizados via GPS para a realização das medições.

[033] Visando a correta identificação das componentes inter-harmônicas associadas aos curtos-circuitos de alta impedância provocados em cada tipo de solo considerado, foi utilizado nos testes o medidor ELSPEC Black Box G4500 Power Quality Analyzer.

[034] Durante os ensaios dos curtos-circuitos de alta impedância em cada um dos terrenos considerados, foram registradas as correntes inter-harmônicas presentes tanto no local do campo de testes, quanto na saída do alimentador ULA38F4.

[035] Para efeito de controle e comparação, todos os registros de formas de onda instantâneas de corrente obtidos na saída do alimentador de distribuição, para cada ensaio de curto-circuito, são comparados com a forma de onda e espectro típicos da corrente do referido alimentador.

[036] De acordo com a Figura 6, estão mostrados no Gráfico 3 a forma de onda e espectro típicos da corrente do alimentador ULA38F4.

[037] De acordo com a Figura 7, é apresentado o Gráfico 4 demonstrando as correntes instantâneas e espectros associados ao ensaio de falta de alta impedância em cimento, um exemplo dos resultados obtidos nos diversos testes feitos com o cabo de energia em curto fase-terra sobre o cimento, areia, brita, terra, capim, asfalto e árvores.

[038] Constatou-se que o curto-circuito associado com a falta de alta impedância produzido em todos os terrenos foi perfeitamente identificado na saída do alimentador de distribuição ULA38F4, sendo que os espectros de corrente, registrados tanto no campo de testes quanto na saída do alimentador apresentaram um conteúdo inter-harmônico relevante em comparação às amplitudes das correntes inter-harmônicas registradas na saída do alimentador em condições normais de carga.

[039] Uma vez concluídas as medições de correntes instantâneas e seus espectros de frequência, associadas aos diversos tipos de curtos-circuitos considerados no trabalho, definiu-se o protocolo de identificação de faltas de altas impedâncias baseadas na análise de correntes inter-harmônicas.

[040] De acordo com a Figura 8, conforme ilustrado no Gráfico 5, é ilustrada a forma de cálculo do indicador IH com janelas fixas com 60 ciclos de duração. Em termos práticos, o indicador IH expressa a soma algébrica das amplitudes das inter-harmônicas situadas na faixa de análise do espectro de corrente. Adicionalmente, a metodologia desenvolvida considera a apuração do indicador IH a cada segundo, através de janelas amostrais fixas com comprimento de 60 ciclos.

[041] Cada valor de IH obtido será comparado ao IH de referência. Ao invés de fixar um valor pré-definido para o IH de referência, optou-se pelo cálculo do IH de referência móvel, o qual sempre levará em consideração o conteúdo inter-harmônico típico de cada instalação. Assim, a cada um minuto, o valor do IH de referência será atualizado, sendo o mesmo igual à média aritmética dos últimos 60 IH's calculados.

[042] As principais vantagens do sistema são: (i) permite a detecção de defeitos nas redes de distribuição de energia elétrica urbanas e rurais, quando os condutores de energia caem no solo ou tocam árvores, bem como o conseqüente desligamento da rede, nessas condições; (ii) permite que a energia seja interrompida sem intervenção humana, propiciando a preservação de vidas quando da ocorrência dos defeitos acima mencionados.

[043] A Figura 9 ilustra o Fluxograma 4, com todas as fases do Sistema de Detecção de Falhas de Alta Impedância Via Correntes Inter e Sub-Harmônicas, objeto da presente patente.

[044] Ainda de acordo com a Figura 9, o presente sistema apresenta as seguintes fases: aquisição da janela de correntes instantâneas de forma discreta, com duração de 1 segundo (1), montagem dos vetores contendo os valores discretos das correntes em cada fase (2), aplicação do filtro FIR nos vetores obtidos (3), cálculo do indicador IH de 1 segundo (4), quantidade de indicadores $IH = 60$ (5), cálculo do indicado IH de 1 minuto (6), $IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$ (7) e, envia comando de abertura da chave (8).

[045] A Figura 10 ilustra o desenho esquemático do Sistema identificador de faltas de alta impedância.

[046] A Figura 11 ilustra o detalhamento das funções do microcontrolador (9) com a definição das faixas de frequência a serem utilizadas, no caso, foram definidas duas faixas: Faixa A, de 40-56Hz e Faixa B, de 64-80Hz.

[047] A Figura 12 ilustra a aplicação do filtro FIR aos sinais de corrente amostrados em cada fase, sendo $i(t)$ o domínio do tempo, A/D o conversor, FIR o filtro e $x[n]$ o sinal filtrado.

[048] Para o cálculo das energias das faixas de frequência foram utilizadas as seguintes equações, sendo que IH = indicador de inter-harmônicas:

$$[050] E_{(A)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_A[n]|^2 \quad \text{e} \quad E_{(B)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_B[n]|^2 \rightarrow IH = E_{(A)} + E_{(B)}$$

[051] A Figura 13a ilustra o cálculo deslizante do indicador IH de 1 segundo.

[052] A Figura 13b ilustra o cálculo do indicador IH de 1 minuto (média simples).

[053] Como critério para abertura da chave (8), utiliza-se a comparação do indicador IH (segundo) atual com a última referência disponível do indicador IH de 1 minuto, onde β = constante para ajuste de sensibilidade da identificação de IH:

$$[054] IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$$

[055] Se $IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$, o microcontrolador (9) enviará comando de abertura para a chave (8).

REIVINDICAÇÕES

1. SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS, para implementação de análise de conteúdo de inter-harmônica da corrente de falta, **caracterizado por** apresentar as seguintes fases: aquisição da janela de correntes instantâneas de forma discreta, com duração de 1 segundo (1); montagem dos vetores contendo os valores discretos das correntes em cada fase (2); aplicação do filtro FIR nos vetores obtidos (3); cálculo do indicador IH de 1 segundo (4); quantidade de indicadores $IH = 60$ (5); cálculo do indicado IH de 1 minuto (6); $IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$ (7); e envia comando de abertura da chave (8).

2. SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS, para implementação de análise de conteúdo de inter-harmônica da corrente de falta, de acordo com a Reivindicação 1, **caracterizado por** utilizar o protocolo de identificação de faltas de altas impedâncias baseadas na análise de correntes inter-harmônicas, após concluídas as medições de correntes instantâneas e seus espectros de frequência, associadas aos diversos tipos de curtos-circuitos; em que o indicador IH expressa a soma algébrica das amplitudes das inter-harmônicas situadas na faixa de análise do espectro de corrente, e adicionalmente, considera a apuração do indicador IH a cada segundo, através de janelas amostrais fixas com comprimento de 60 ciclos; em que cada valor de IH obtido será comparado ao IH de referência, calculando-se o IH de referência móvel, levando em consideração o conteúdo inter-harmônico típico de cada instalação; em que cada um minuto, o valor do IH de referência será atualizado, sendo o mesmo igual à média aritmética dos últimos 60 IH's calculados.

3. SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS, para implementação de análise de conteúdo de inter-harmônica da corrente de falta, de acordo com as Reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** realizar o detalhamento das funções do microcontrolador (9) com a definição de frequência em duas faixas, 40-56Hz e 64-80Hz; aplicação do filtro FIR aos sinais de corrente amostrados em cada

fase; para o cálculo das energias das faixas de frequência são utilizadas equações, sendo IH o indicador de inter-harmônicas:

$$E_{(A)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_A[n]|^2 \quad \text{e} \quad E_{(B)} = \sum_{n=0}^{N-1} |x_B[n]|^2 \rightarrow IH = E_{(A)} + E_{(B)}$$

4. SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA VIA CORRENTES INTER E SUB-HARMÔNICAS, para implementação de análise de conteúdo de inter-harmônica da corrente de falta, de acordo com qualquer uma das Reivindicações anteriores, **caracterizado por** utilizar o cálculo deslizante do indicador IH de 1 segundo e o cálculo do indicador IH de 1 minuto (média simples); para abertura da chave (8) utiliza-se a comparação do indicador IH (segundo) atual com a última referência disponível do indicador IH de 1 minuto, onde β = constante para ajuste de sensibilidade da identificação de IH:

$$IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$$

e se $IH_k > \beta \times IH_{REF(k-1)}$, o microcontrolador (9) enviará comando de abertura para a chave (8).

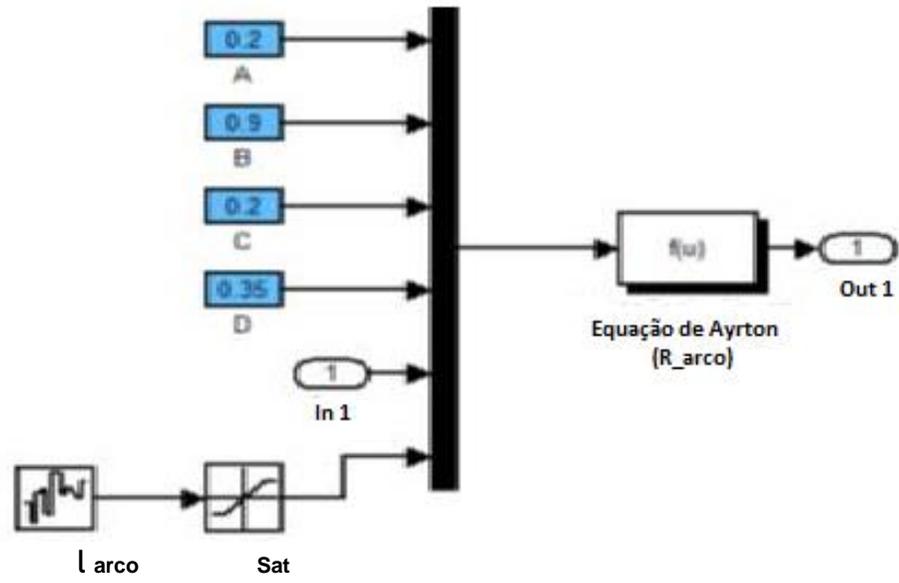


Figura 1

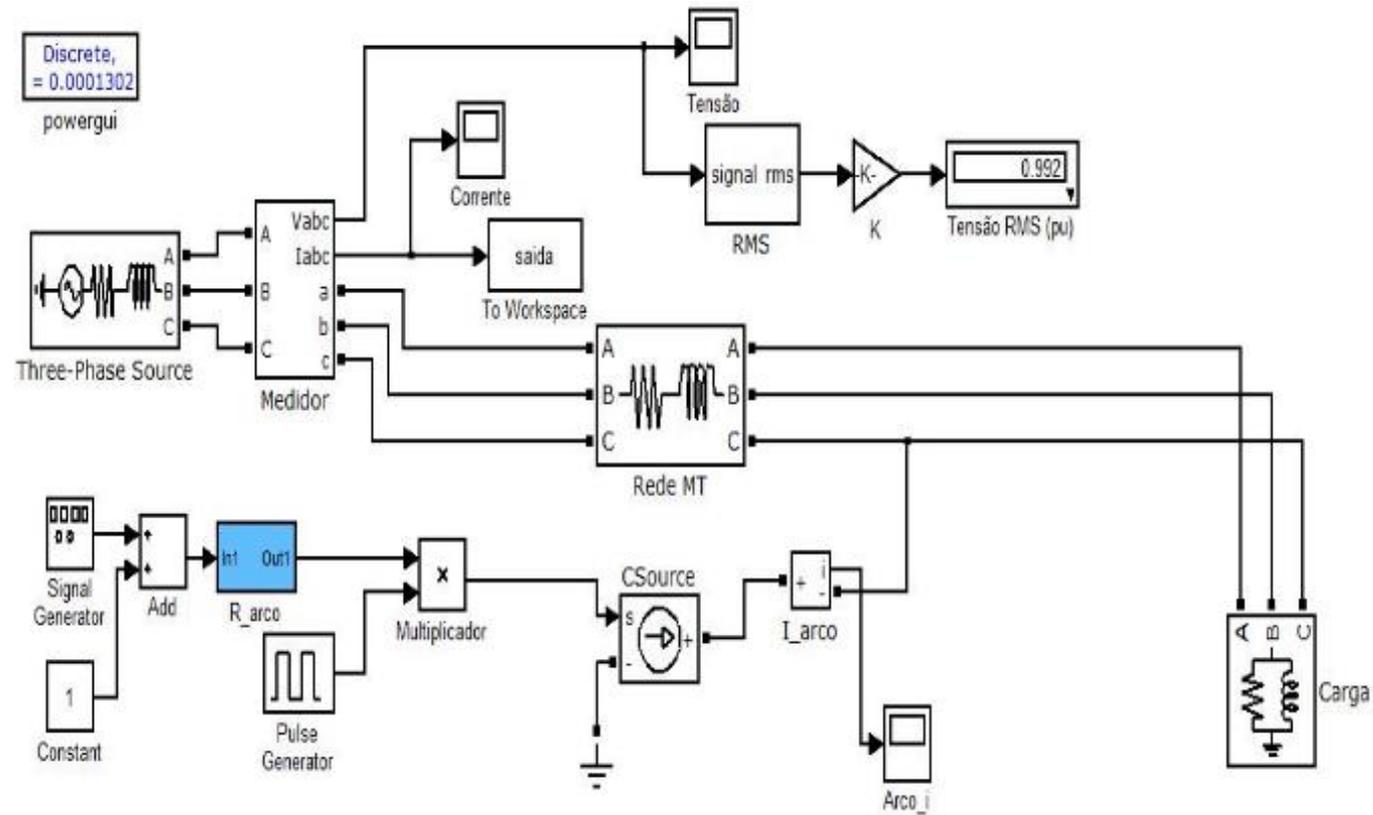


Figura 2

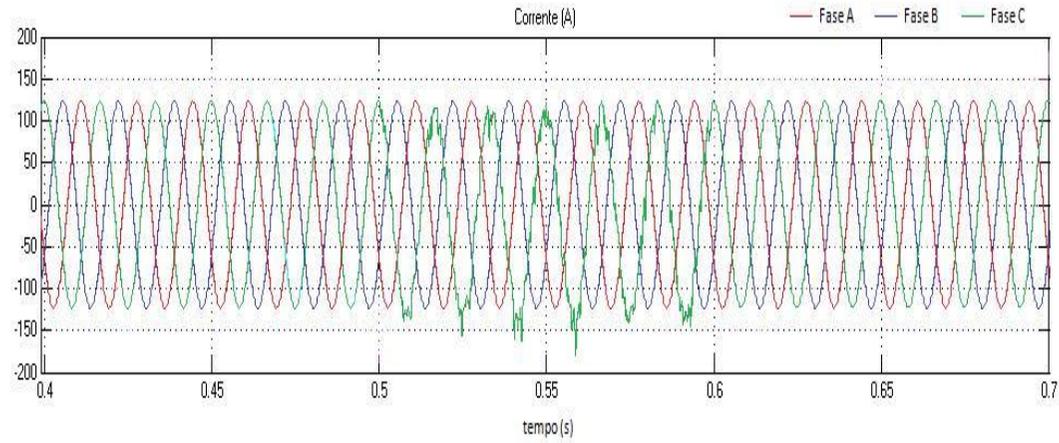


Figura 3

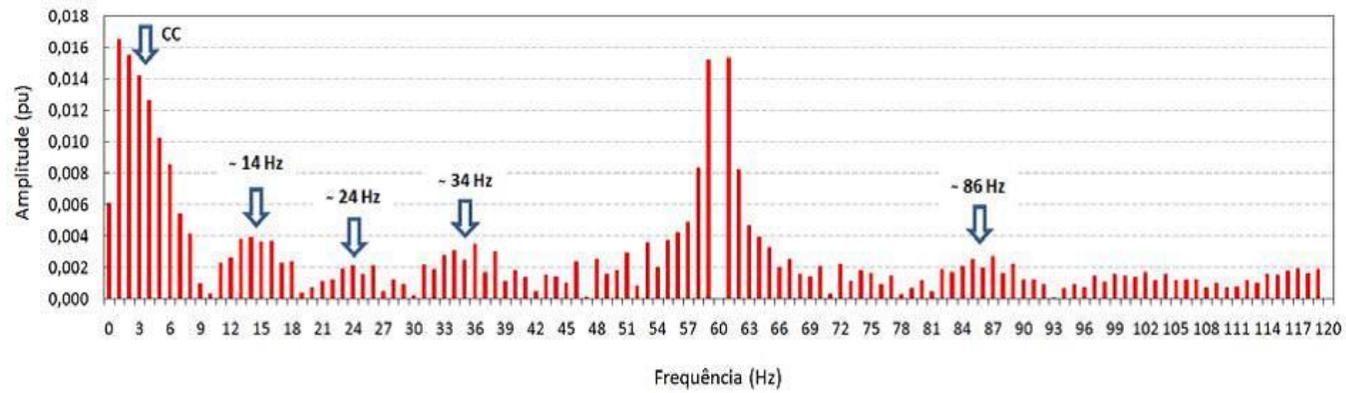


Figura 4

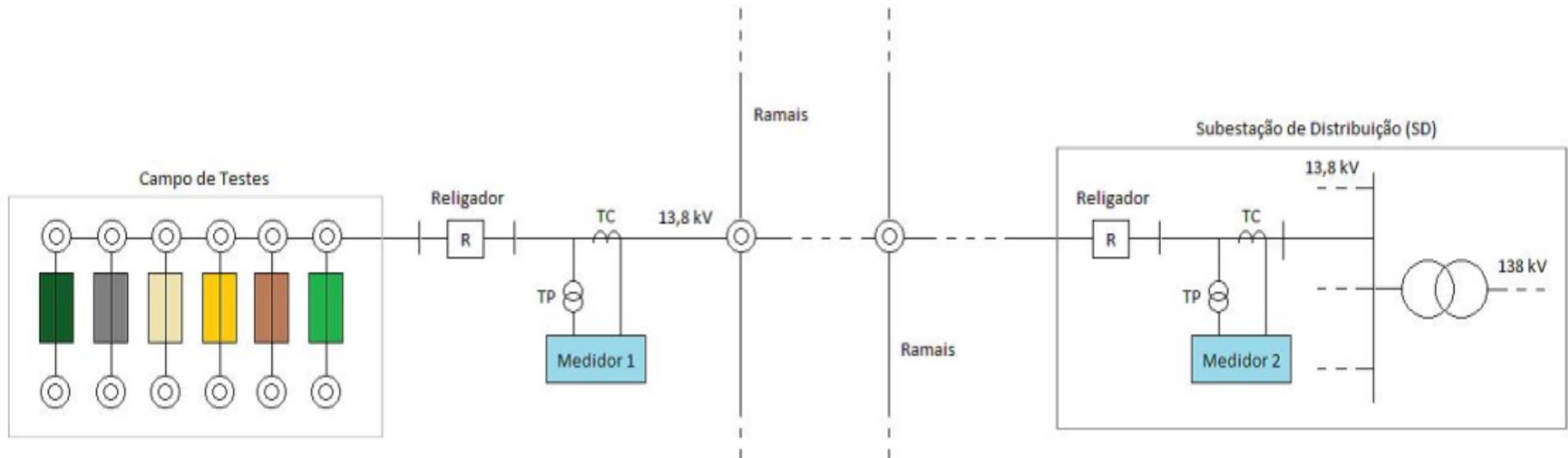
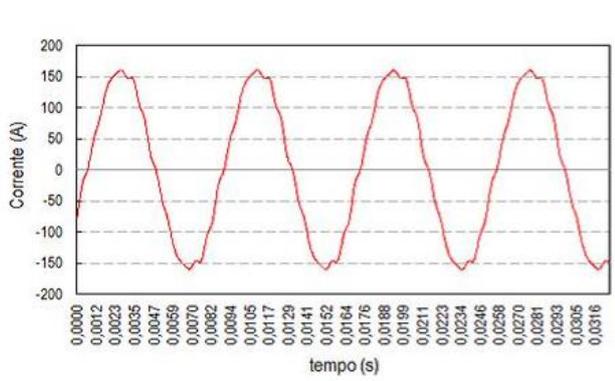
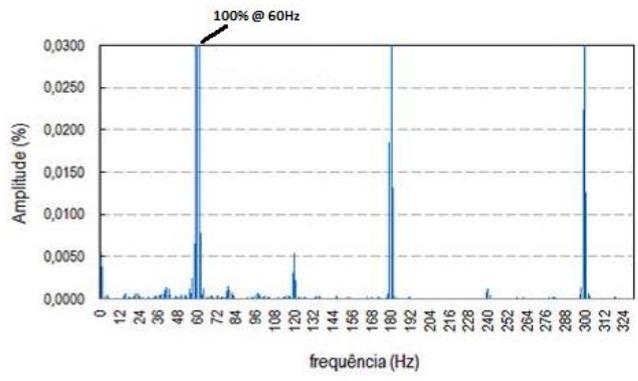


Figura 5



Corrente típica do alimentador

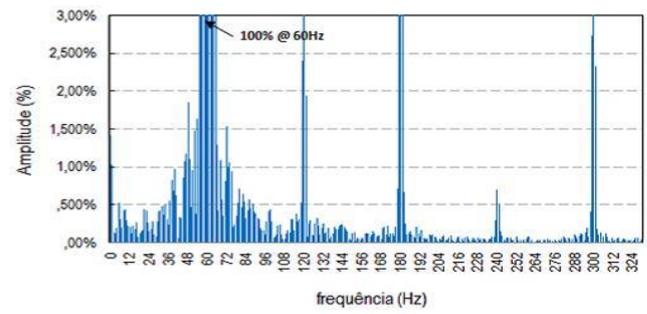


Espectro típico do alimentador

Figura 6



Medição no campo de testes



Medição na saída do alimentador ULA38F4

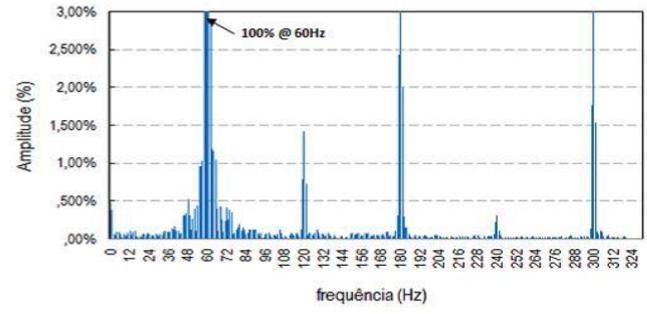


Figura 7

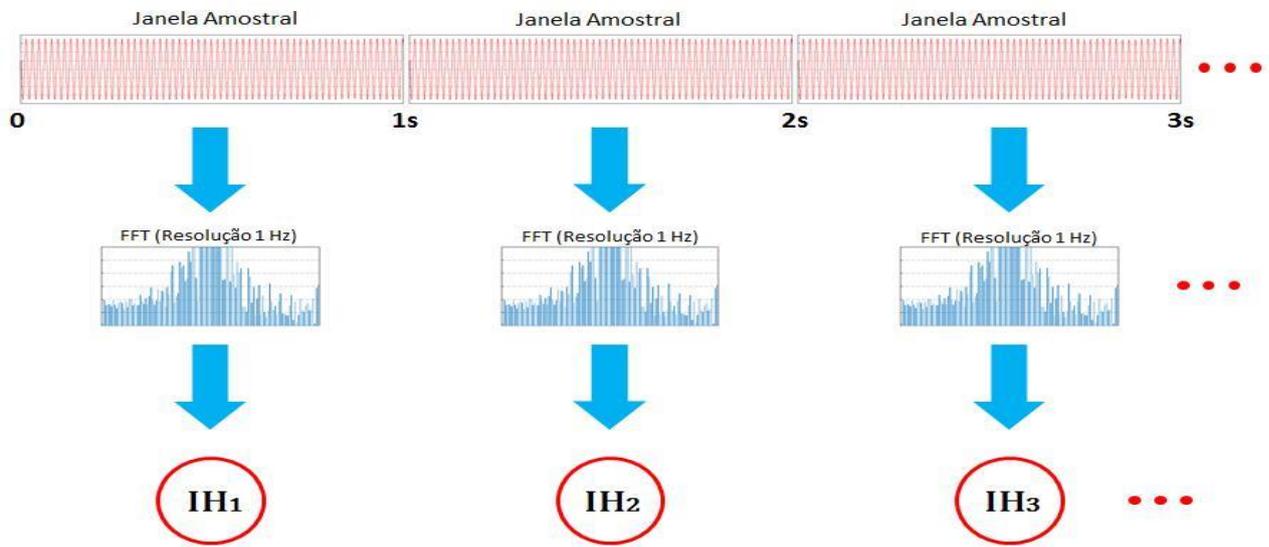


Figura 8

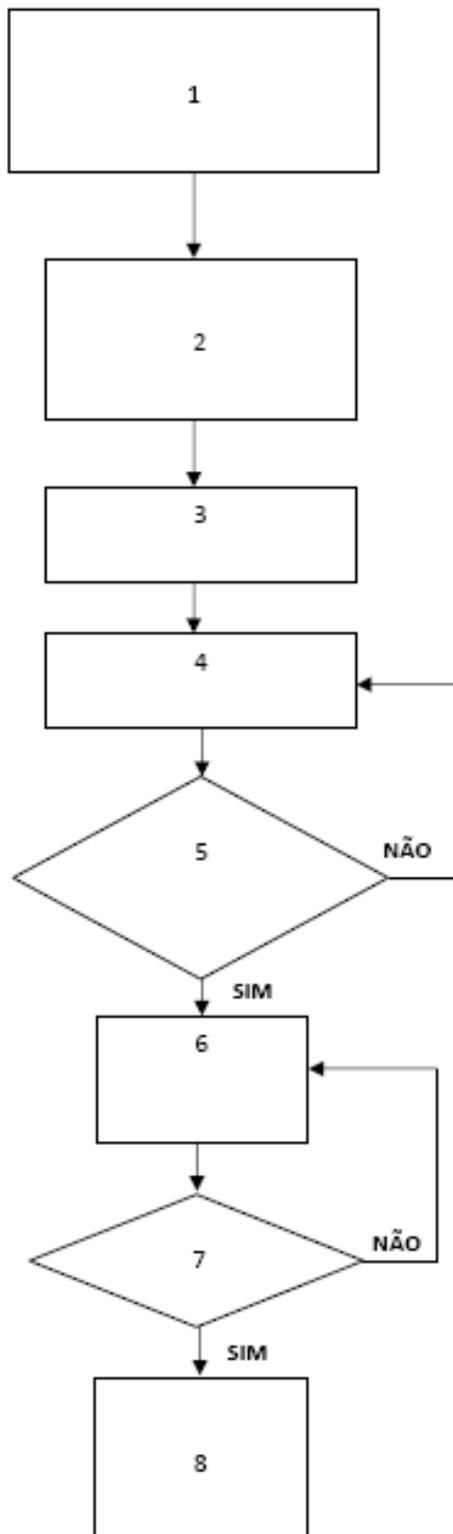


Figura 9

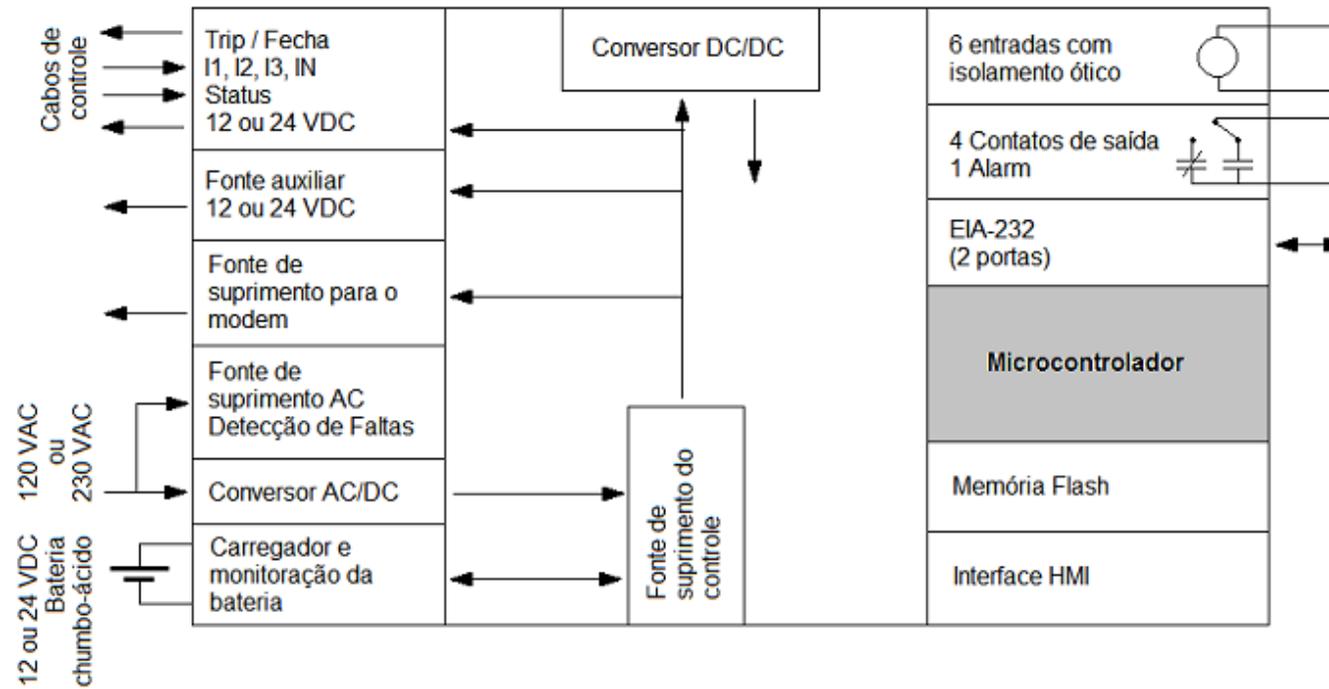


Figura 10

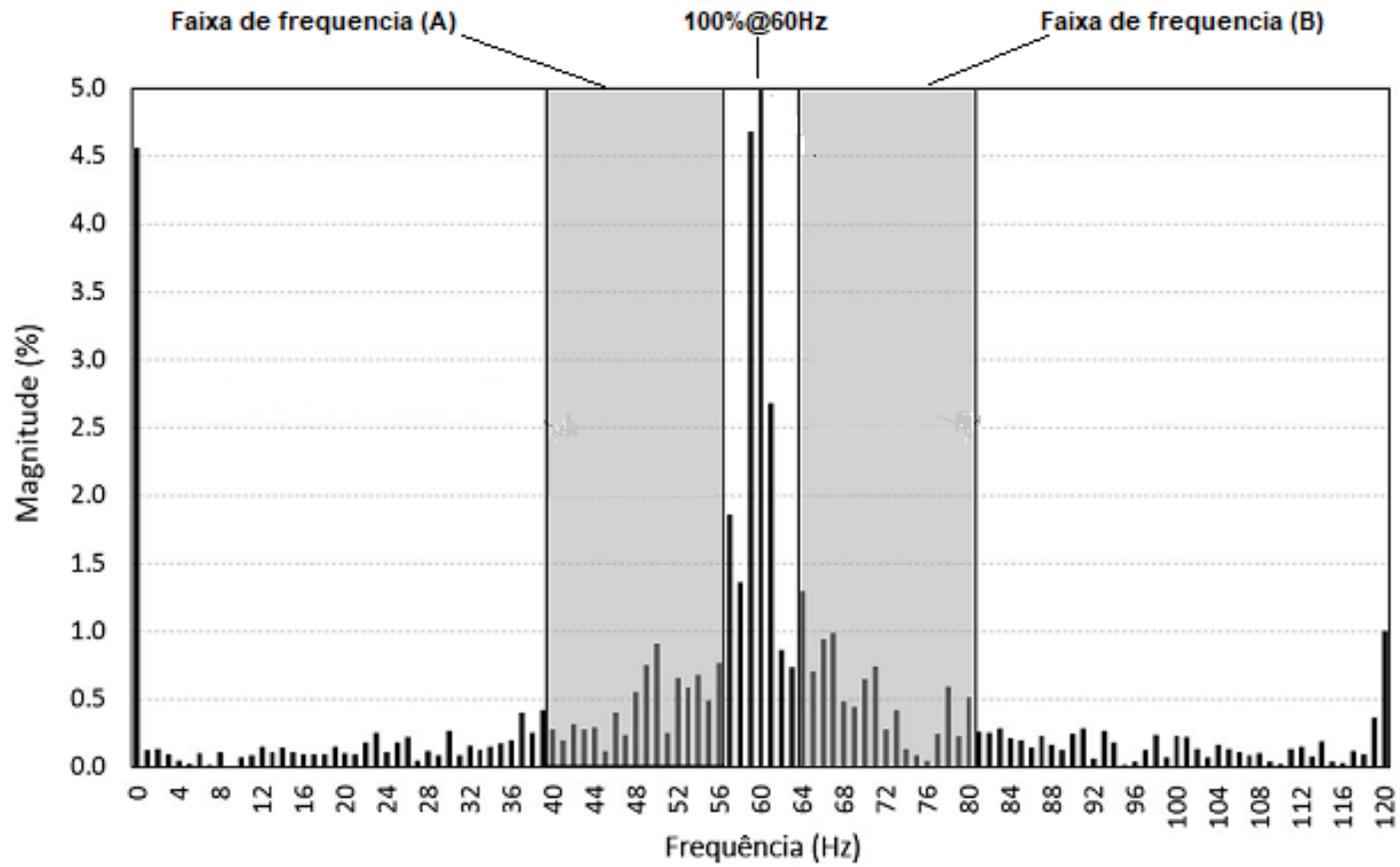


Figura 11

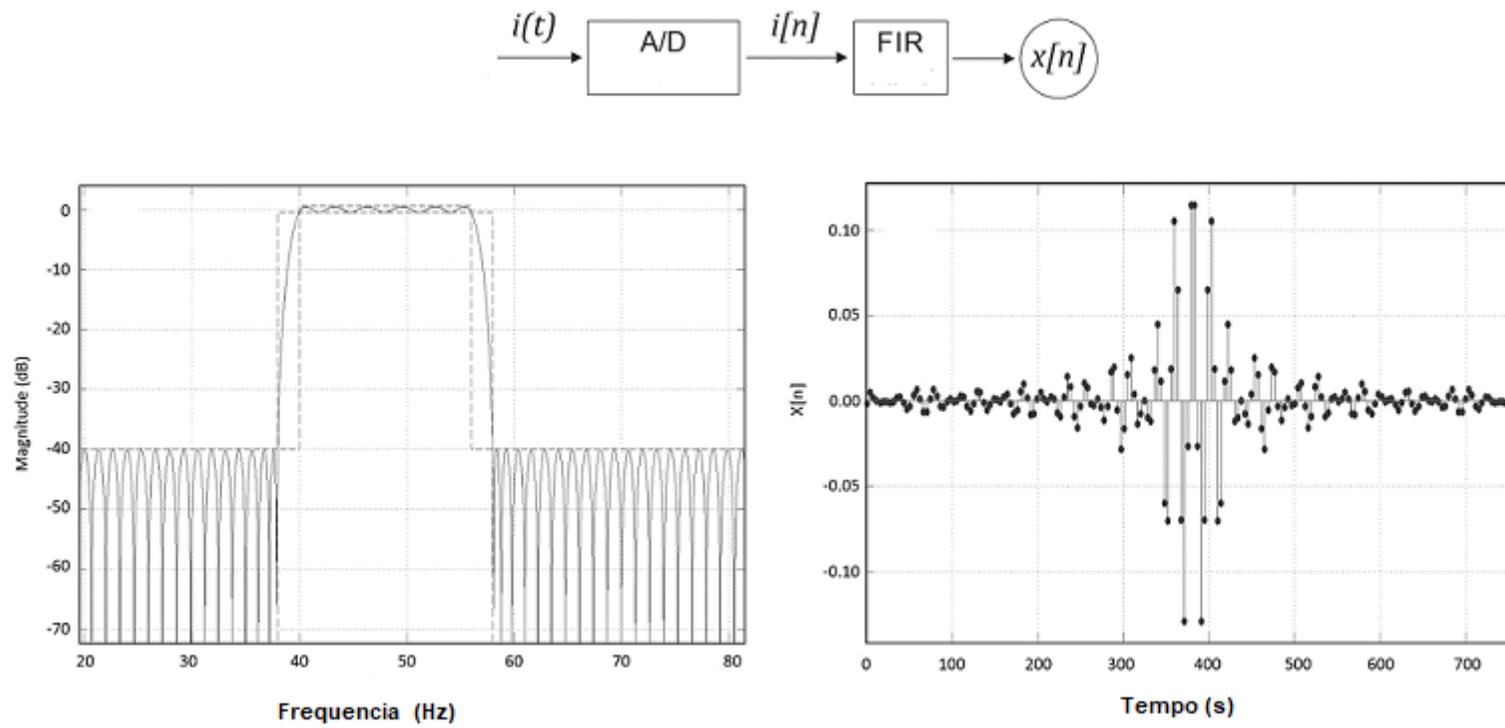


Figura 12

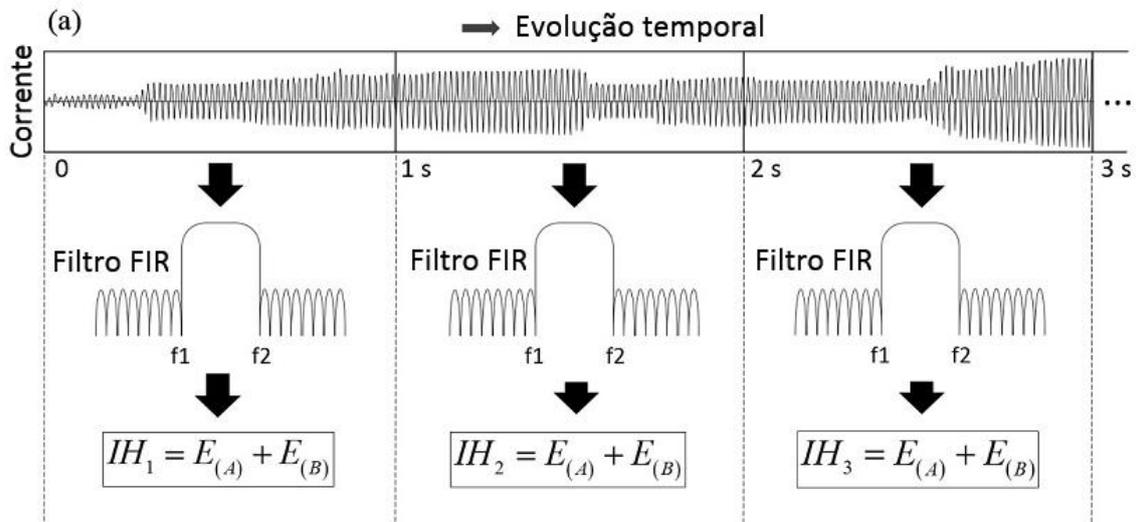


Figura 13a

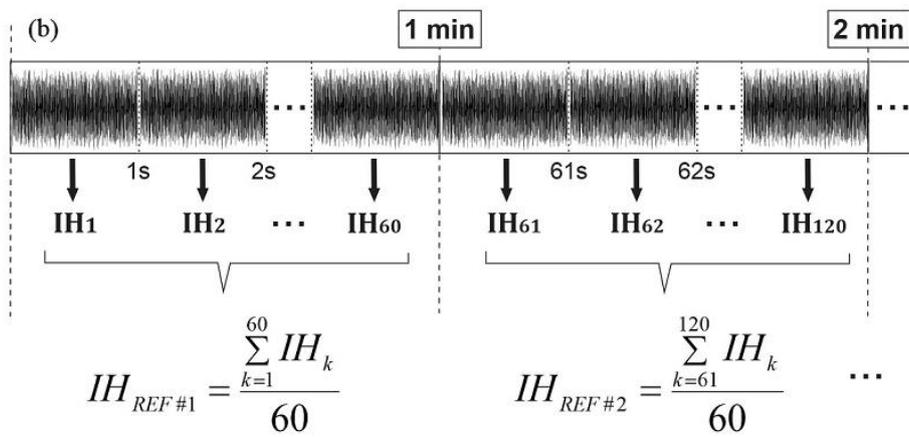


Figura 13b