



**ESTRATÉGIAS DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL  
DE BUCHAS CONDENSIVAS**

Marcos Paulo Giarola Botelho

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Orientador: Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2011

**ESTRATÉGIAS DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL  
DE BUCHAS CONDENSIVAS**

Marcos Paulo Giarola Botelho

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

---

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.  
(Orientador)

---

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

---

Cesar Cosenza de Carvalho, D. Sc.

---

Eng. Rafael Vendrell Ribeiro

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2011

# Agradecimentos

---

Agradeço aos meus amigos e familiares pelo apoio durante toda essa jornada e em especial aos meus pais, por toda educação a mim ministrada por meio de força e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Gostaria de agradecer a todos os professores que participaram da minha formação e ao meu orientador José Luiz da Silva Neto pelos ensinamentos e pela total confiança a mim depositado no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) por toda paciência e boa vontade de ajudar e ensinar, e em especial aos amigos Hugo de Cuffa e Rafael Vendrell Ribeiro, que contribuíram com o desenvolvimento deste projeto.

Por fim, agradeço aos grandes amigos de turma pelo companheirismo e pelas longas horas de estudo.

"Por mais humilde que seja,  
um bom trabalho inspira uma sensação de vitória."

**Jack Kemp**

# Resumo

---

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF), vinculado ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), para um projeto de pesquisa e desenvolvimento inerente a Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (Eletronorte), cuja finalidade foi desenvolver um sistema de monitoração para buchas condensivas.

As buchas de alta tensão, encontradas em linhas de transmissão, subestações e em transformadores de grandes consumidores de energia elétrica, são equipamentos projetados para garantir o isolamento elétrico entre um condutor energizado e sua estrutura de fixação, normalmente aterrada, em casos no qual a característica dielétrica do ar não é suficiente para garantir o nível de isolamento.

O método de sensoriamento desenvolvido adquiri sinais de tensão da bucha em operação e exibe em tempo real os resultados dos cálculos dos parâmetros necessários para o monitoramento do equipamento, como a capacitância de isolação e o fator de potência. O sistema propicia ao operador decidir a necessidade da retirada ou não de um equipamento, evitando assim uma possível falha.

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
	1.1 - Motivação .....	1
	1.2 - Organização do Texto .....	4
<b>2</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>5</b>
	2.1 - Buchas de alta Tensão.....	5
	2.2 - Tipos de Buchas.....	5
	2.2.1 - Buchas Não-Condensivas .....	6
	2.2.2 - Buchas Condensivas .....	6
	2.3 - Características de Buchas Condensivas de Alta Tensão .....	7
<b>3</b>	<b>Métodos de Monitoração do Estado de Buchas Condensivas</b>	<b>12</b>
	3.1 - Introdução .....	12
	3.2 - Somatório das Correntes de Fase.....	13
	3.3 - Sensoriamento Proposto .....	18
<b>4</b>	<b>Simulações e Comparações entre Métodos</b>	<b>22</b>
	4.1 - Descrição .....	22
	4.2 – <i>Phase-locked loop</i> (PLL) .....	22
	4.3 - Sensoriamento Proposto .....	24
	4.4 - Somatório das Correntes de Fase.....	31
	4.5 - Discussão.....	34

<b>5</b>	<b>Sistema de Medição</b>	<b>35</b>
	5.1 - Metodologia.....	35
	5.2 - Sensor de tensão .....	36
	5.3 - Placa de aquisição .....	37
	5.4 - Montagem em bancada.....	37
	5.5 - Resultados .....	41
	5.6 - Resultados Experimentais Utilizando o Método do Somatório das Correntes .....	49
	5.7 - Discussão.....	55
<b>6</b>	<b>Conclusão e Proposta de Trabalhos Futuros</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>58</b>

# Lista de Figuras

---

Figura 1 - Bucha de alta tensão após ocorrência de falha. ....	2
Figura 2 - Bucha de alta tensão e transformador em chama após ocorrência de falha.....	3
Figura 3 - Bucha não-condensiva.....	6
Figura 4 - Vista seccionada da bucha. ....	7
Figura 5 - Detalhes de <i>tap</i> capacitivo de bucha de transformado de 500 kV. ....	8
Figura 6 - Representação elétrica da bucha.....	9
Figura 7 - Circuito equivalente de uma bucha condensiva energizada. ....	10
Figura 8 – Impedâncias analisadas pela bucha .....	10
Figura 9 - Medição e soma da corrente de fase de três buchas.....	13
Figura 10 - Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória (em verde), para uma dada condição inicial. ....	14
Figura 11 - Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória, com alteração na capacitância e fator de potência da fase ...	15
Figura 12 - Diagrama fasorial ilustrando as regiões de localização da corrente resultante para degradação de apenas uma fase .....	16
Figura 13 - Bucha com sensor capacitivo. ....	19
Figura 14 - Diagrama de blocos do PLL proposto por Karimi.....	23
Figura 15 - Modelo do Simulink do PLL proposto por Karimi. ....	23
Figura 16 - Diagrama de blocos da simulação do método de Sensoriamento Proposto. ....	25
Figura 17 - Sinais $V_{\text{linha}}$ (azul) e $V_{\text{tap}}$ (vermelho) no mesmo gráfico .....	26



Figura 18 - Resultado do cálculo da resistência.....	27
Figura 19 - Resultado do cálculo da capacitância .....	27
Figura 20 - Resultado do cálculo do fator de potência .....	28
Figura 21 - Resultado do cálculo da resistência.....	29
Figura 22 - Resultado do cálculo da capacitância .....	29
Figura 23 – Resultado do cálculo do fator de potência .....	30
Figura 24 – Diagrama de blocos da simulação do método de Somatório das Correntes de Fase.....	32
Figura 25 – Esquema simplificado do sistema de aquisição .....	35
Figura 26 – Sensor de tensão da LEM.....	36
Figura 27 – Placa de aquisição de sinais utilizada.....	37
Figura 28 – Circuito esquemático do sistema de medição .....	39
Figura 29 - Placa de aquisição e proteção .....	39
Figura 30– Sistema de medição montado em bancada .....	40
Figura 31 – Detalhe dos conectores BNC .....	41
Figura 32– Sinais $V_{Linha}$ (azul) e $V_{tap}$ (roxo) .....	42
Figura 33 – Resultado do cálculo da resistência .....	43
Figura 34 – Resultado do cálculo da capacitância .....	44
Figura 35 – Resultado do cálculo do fator de potência .....	44
Figura 36 - Sinais $V_{Linha}$ (azul) e $V_{tap}$ (verde) .....	46
Figura 37 – Resultado do cálculo da resistência .....	47
Figura 38 – Resultado do cálculo da capacitância .....	48
Figura 39 – Resultado do cálculo do fator de potência .....	48
Figura 40 – Diagrama do sistema de medição .....	49

Figura 41 – Circuito esquemático da placa de aquisição .....	50
Figura 42 – Sistema de medição montado em bancada. ....	51
Figura 43 – Tensões trifásicas utilizadas no protótipo e a tensão <i>TAP</i> , em verde ....	52
Figura 44 - Sinais $V_{\text{Linha}}$ (verde) e $V_{\text{tap}}$ (azul) .....	54

# Lista de Tabelas

---

Tabela 1 – Resultados da simulação do método de sensoriamento proposto para uma bucha nova.....	28
Tabela 2 - Resultados da simulação do método de sensoriamento proposto para uma bucha degradada.....	30
Tabela 3 - Resultados da simulação do método somatório das correntes de fase para uma bucha degradada.....	34
Tabela 4 - Resultados do protótipo utilizando o método de sensoriamento proposto para uma bucha nova.....	45
Tabela 5 - Resultados do protótipo utilizando o método de sensoriamento proposto para uma bucha degradada.....	49
Tabela 6 - Resultados do protótipo utilizando o método somatório das correntes de fase para uma bucha degradada.....	55

# Capítulo 1

---

## Introdução

### 1.1 - Motivação

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de monitoração *on-line* de buchas condensivas de alta tensão. As buchas de alta tensão, encontradas em linhas de transmissão, subestações e em transformadores de grandes consumidores de energia elétrica, são equipamentos hermeticamente fechados e projetados para trabalhar ao tempo ou abrigados, submetidos às solicitações elétricas e mecânicas normais de regime permanente, ou anormais, e transitórias previstas de ocorrerem em serviço. Seu funcionamento serve para garantir o isolamento elétrico entre um condutor energizado e sua estrutura de fixação, normalmente aterrada, em casos no qual a característica dielétrica do ar não é suficiente para garantir este nível de isolamento [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Tais buchas estão entre os componentes mais críticos de um sistema de potência, e está sujeita a vários tipos de intempéries como alta temperatura, umidade e descargas atmosféricas, campos elétricos e magnéticos de alta intensidade e outros surtos [7, 8]. Dessa forma, existe uma deterioração da bucha ao longo do tempo que pode levar à ocorrência de falhas da mesma e, conseqüentemente, dos equipamentos das quais fazem parte.

Essas falhas geram riscos elevados de acidentes envolvendo: equipamentos de alto custo; vidas humanas; o inconveniente de ter uma interrupção no

fornecimento de energia; custos na troca ou reparo dos equipamentos; e aumento no valor do contrato de seguro desses equipamentos. Nas figuras 1 e 2 são apresentados exemplos de falhas envolvendo buchas de alta tensão de transformadores de potência.



**Figura 1 - Bucha de alta tensão após ocorrência de falha.**  
**Fonte: Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão [9].**

Na figura 2, a falha da bucha ocasionou a explosão do transformador.



**Figura 2 - Bucha de alta tensão e transformador em chama após ocorrência de falha.  
Fonte: Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão [9].**

Tem sido crescente, portanto, o interesse das concessionárias do setor de energia elétrica, de indústrias de serviço público e de grandes empresas, por sistemas de monitoramento e diagnóstico do estado das buchas.

Em vista de todas essas importâncias supracitadas das buchas de alta tensão, esse trabalho tem como objetivo principal apresentar um novo método de monitoração *on-line* que possa dar embasamento ao operador, de tal maneira que seja confiável decidir a necessidade da substituição, ou não, de uma bucha em operação, para evitar uma iminente falha.

## 1.2 - Organização do Texto

Este trabalho está estruturado em seis capítulos dispostos da seguinte forma:

No capítulo 1, como visto, foi descrita uma introdução sobre as buchas e a motivação para esse projeto ser realizado.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos da bucha de alta tensão abordando os tipos e as principais características.

No capítulo 3 são apresentados dois métodos de monitoramento *on-line* de buchas, um disponível na literatura e de grande uso comercial, e o método proposto e desenvolvido neste trabalho.

No capítulo 4, a metodologia utilizada para a realização de uma simulação em ambiente *MatLab* empregando o *Simulink* é detalhada, além de serem apresentados os resultados e as discussões das simulações.

No capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento do protótipo de bancada dos dois sistemas de medição e discutidos os resultados.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

---

## Fundamentos Teóricos

### 2.1 - Buchas de alta Tensão

Uma bucha de alta tensão é um dispositivo utilizado para fazer a passagem de um condutor eletricamente energizado em alta tensão através de alguma barreira aterrada ou em um potencial elétrico muito diferente do potencial do condutor [9]. Exemplos de tais barreiras são paredes que abrigam uma subestação e tanques de metal utilizados em equipamentos de alta tensão como transformadores, reatores e disjuntores. Uma bucha de alta tensão deve fornecer isolamento elétrico para a tensão nominal e eventuais sobretensões do sistema, e também serve como suporte mecânico para os condutores e conexões externas [10, 11].

### 2.2 - Tipos de Buchas

As características que definem os tipos de buchas de alta tensão dependem da tensão nominal, dos materiais do meio isolante que a constituem e do ambiente no qual será instalada. Em termos gerais, as buchas são divididas em dois tipos: não-condensivas e condensivas [9].



### 2.2.1 - Buchas Não-Condensivas

As buchas não-condensivas possuem um condutor revestido por material ou meio isolante como porcelana, vidro, resina, papel, etc. Como mostrado na figura 3. o raio “a” é função da tensão elétrica no condutor, das características do material isolante e da geometria dos eletrodos, e o raio “b” é função do ambiente no qual a bucha é utilizada.

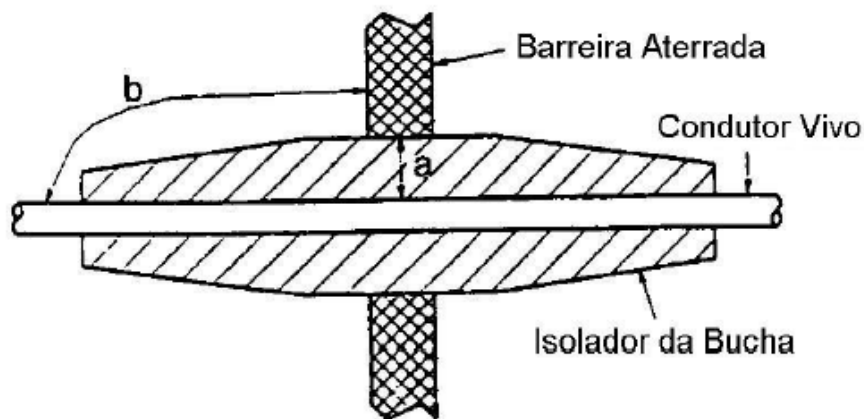


Figura 3 - Bucha não-condensiva.

Fonte: Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão [9].

Conforme a tensão nominal aumenta, as dimensões da bucha, resultante de considerações sobre campo elétrico e possibilidades de descargas, podem aumentar de tal forma a tornar impraticável a sua construção.

### 2.2.2 - Buchas Condensivas

Utilizada para tensões nominais acima de 50 kV, o princípio da bucha condensiva consiste em camadas de papel dispostos em volta do condutor central

da bucha, formando assim capacitores concêntricos entre o tubo e o flange de montagem [9].

Como iremos analisar apenas este tipo de bucha no presente trabalho, daremos ênfase maior no tópico 2.3, que abordará as características principais das buchas condensivas.

### 2.3 - Características de Buchas Condensivas de Alta Tensão

Composta por condutor central, material isolante e carcaça de cerâmica, as buchas condensivas são capazes de garantir níveis de isolamento superiores ao do ar. Os dispositivos em questão utilizam estruturas com características dielétricas acentuadas, tais como superfícies cilíndricas de papel imerso em óleo dielétrico e carcaça de cerâmica projetada para apresentar a maior área exposta possível ao meio-ambiente, de modo a evitar condução elétrica por acúmulo de impurezas na mesma [4]. Na figura 4 pode-se observar uma visão seccionada da bucha.

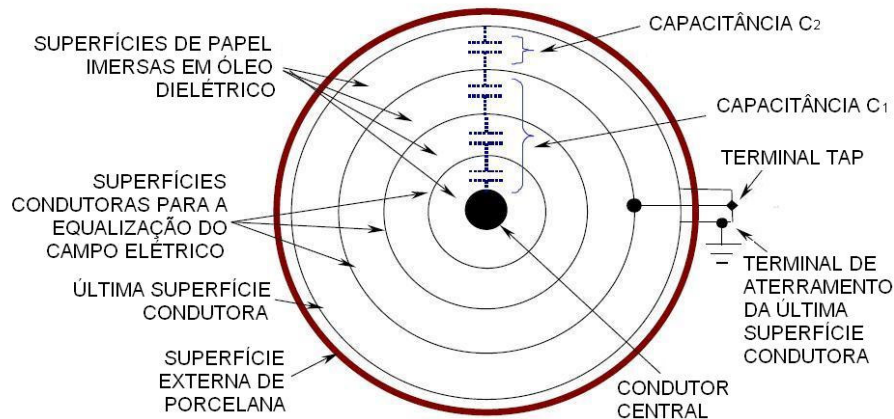
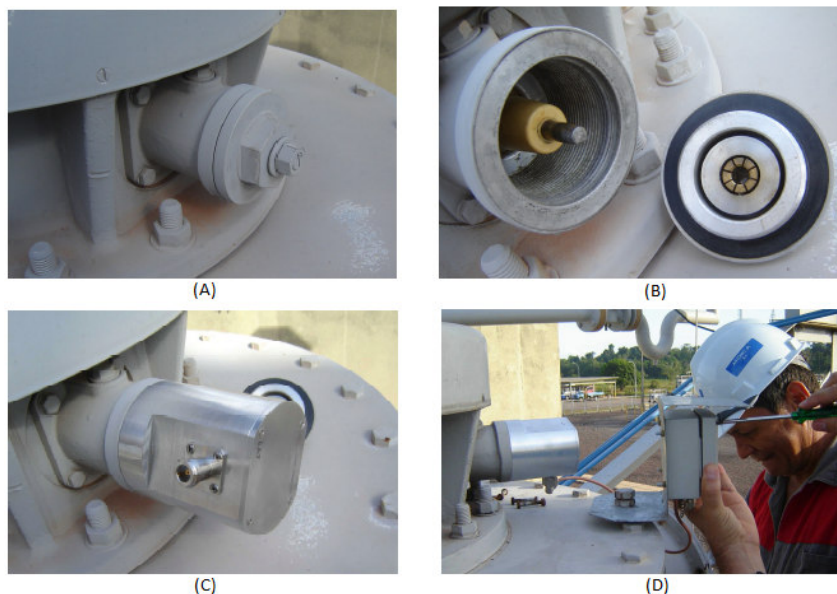


Figura 4 - Vista seccionada da bucha.

Fonte: Experiência com Monitoração *Online* de capacitância e Tangente *Delta* de Buchas Condensivas [4].

A bucha é dotada de um terminal externo que possibilita o acesso à parte interna do seu isolamento, o *tap* capacitivo, que é utilizado para o monitoramento do seu isolamento. Este terminal está localizado entre a última camada de isolamento da bucha e o terra.

O *tap* capacitivo é utilizado para medições de grandezas elétricas relacionadas à bucha, como por exemplo, tensão, descargas parciais, capacitância, fator de potência e tangente *delta*. Como a capacitância da bucha é muito menor que a capacitância entre a última camada de isolação e o terra, para prevenir a geração de alta tensão e centelhamento no *tap* capacitivo é de suma importância que este seja mantido curto-circuitado quando a bucha estiver em serviço e o *tap* não estiver sendo utilizado. Na figura 5 são mostrados detalhes de *taps* capacitivos e conexões realizadas nele para o monitoramento da bucha.



**Figura 5 - Detalhes de *tap* capacitivo de bucha de transformado de 500 kV. (A) *Tap* capacitivo com tampa original que o mantém curto-circuitado; (B) *Tap* capacitivo aberto; (C) Adaptador conectado ao *tap* capacitivo; (D) Fixação de uma caixa de impedância de medição conectada ao *tap* capacitivo de uma bucha.**

**Fonte: Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão [9].**

Com a finalidade de evitar descargas elétricas internas, provocadas por imperfeições na distribuição interna do campo elétrico, são implementadas superfícies de material condutor intercalando as de papel dielétrico, equalizando o gradiente do potencial do campo elétrico e com isso criando o efeito capacitivo do isolamento [10].

Pode-se visualizar na figura 6, que o terminal *tap* encontra-se conectado entre os elementos  $C_1$  e  $C_2$ , desta maneira tem-se que a arquitetura da bucha é equivalente à de um divisor capacitivo [1].



**Figura 6 - Representação elétrica da bucha.**  
**Fonte: Adaptado de “Substation Equipments (Bushings)” [7].**

Quando a tensão fase-terra é aplicada à bucha, uma corrente, usualmente denominada corrente de fuga, passa a circular através de sua isolação, devido principalmente à sua capacitância, e em muito menor proporção devido às suas perdas dielétricas. A figura 7 ilustra esta situação. Nela pode-se observar o equivalente elétrico [4] obtido com a construção mostrada na figura 6.

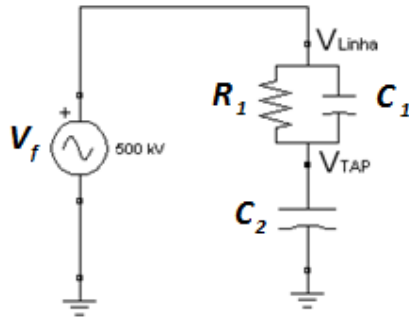


Figura 7 - Circuito equivalente de uma bucha condensiva energizada.

Ainda com relação à figura 7 têm-se que  $R_1$  representa a componente resistiva da impedância da isolação, que gera a parte resistiva da corrente de fuga, associada às perdas dielétricas, sendo  $C_1$  e  $C_2$  as componente reativas devido à capacitância da isolação.

Analisando-se a impedância  $Z_{eq}$ , paralelo  $R_1 \parallel C_1$ , tem-se pela equação 2.1, cujo gráfico de impedâncias é mostrado na figura 8

$$Z_{eq} = R_1 \parallel C_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = \frac{R_1 - j\omega R_1^2 C_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} \quad (2.1)$$

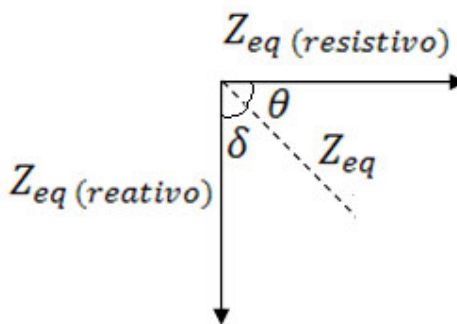


Figura 8 – Impedâncias analisadas pela bucha

Dentre os métodos de análise das condições de isolamento, afetadas por degradações internas à bucha, monitora-se a tangente *delta* ou o fator de potência,

grandezas associadas às perdas no isolamento e que relaciona a componente capacitiva e a componente reativa da corrente total que circula pela bucha e a capacitância da isolação.

Para o cálculo do fator de potência da bucha calcula-se o ângulo  $\theta$ , extraído através do argumento de  $Z_{eq}$ , exibido na equação 2.1 e apresentado na figura 8. A equação 2.2 demonstra o cálculo

$$\begin{aligned}\theta = \angle Z_{eq} &= \angle \left( \frac{R_1 - j\omega R_1^2 C_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} \right) = \angle(R_1 - j\omega R_1^2 C_1) - \angle[1 + (\omega R_1 C_1)^2] \\ &= \tan^{-1}(-\omega R_1 C_1)\end{aligned}\quad (2.2)$$

o fator de potência então é calculado pela equação 2.3

$$fp = \cos(\theta) = \cos[\tan^{-1}(-\omega R_1 C_1)] = \cos[\tan^{-1}(\omega R_1 C_1)] \quad (2.3)$$

O cálculo da tangente *delta* irá ser realizado pela relação trigonométrica entre os ângulos  $\theta$  e  $\delta$ , exibido na figura 8. A equação 2.4 demonstra o cálculo do ângulo  $\delta$

$$\delta = 90 - \theta = 90 - \tan^{-1}(-\omega R_1 C_1) \quad (2.4)$$

a tangente *delta* então é obtida pela equação 2.5

$$\tan \delta = \tan[90 - \tan^{-1}(-\omega R_1 C_1)] = \cot(\tan^{-1}(-\omega R_1 C_1)) = \frac{1}{\omega R_1 C_1} \quad (2.5)$$

O capítulo 3 descreverá com detalhes os métodos de análise da bucha.

# Capítulo 3

---

## Métodos de Monitoração do Estado de Buchas Condensivas

### 3.1 - Introdução

Pode-se dividir os métodos para avaliação do estado de buchas em *on-line* ou *off-line*, ou seja, métodos que avaliam o estado da bucha enquanto está em operação, e métodos que necessitam da interrupção do funcionamento da bucha, como por exemplo, a análise de gases e de umidade entre outras [9].

Métodos como a termovisão podem ser executados com a bucha em operação, contudo, não oferece informações suficientes para se diagnosticar o real estágio de degradação do equipamento sob análise. Dessa forma, este tipo de método é utilizado como complemento para a monitoração das buchas de alta tensão [2].

Daremos destaque aos métodos *on-line*, já que as análises *off-line* não foram abordados neste projeto. Dentre os métodos *on-line* mais tradicionais podemos destacar a Ponte de Schering [1, 2], o Somatório das Correntes de Fase [3, 4] e a Detecção do Cruzamento por Zero [7]. Neste trabalho iremos discorrer sobre o Somatório das Correntes de Fase, por ser o de maior utilização comercial e o método de sensoriamento proposto, desenvolvido para este projeto.

### 3.2 - Somatório das Correntes de Fase

Um dos métodos mais utilizados no processo de diagnóstico do estado de buchas condensivas é o chamado Somatório das Correntes de Fase. Seu princípio básico consiste em supor que o potencial do terminal *tap* é sempre desprezível em comparação com as tensões de linha – também supostas equilibradas [3, 4]. Na figura 9 pode ser visto a representação do trafo trifásico.

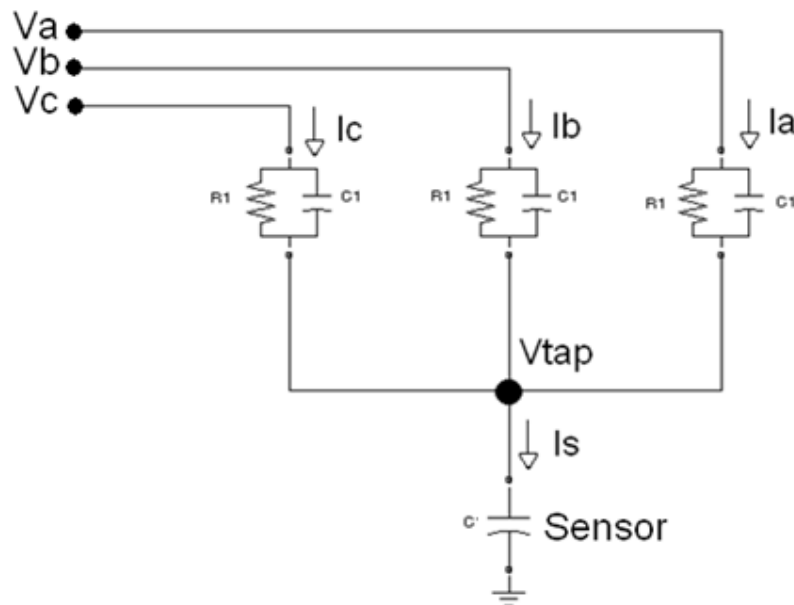
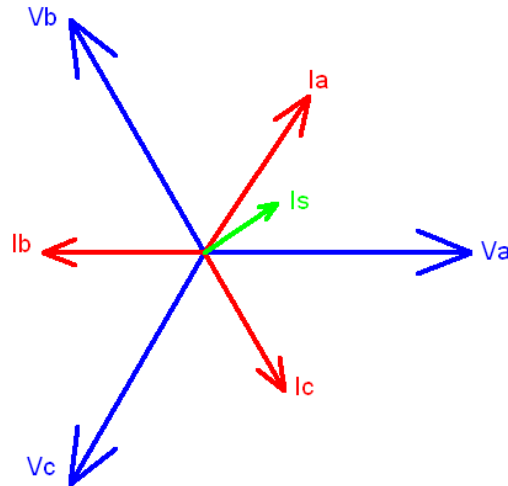


Figura 9 - Medição e soma da corrente de fase de três buchas.

No momento do seu comissionamento as características das três buchas são muito parecidas. Desta maneira, realizando-se a soma vetorial das três correntes de fuga através de um sensor, geralmente capacitivo, que passa por cada uma delas, a resultante será nula ou muito próxima de zero. Como na realidade as buchas nunca são idênticas e, uma vez que as tensões não são perfeitamente equilibradas, a corrente somatória existirá, mesmo no início do seu tempo em serviço. Esta resultante inicial deverá ser cuidadosamente medida, pois deverá ser compensada a



cada instante posterior de medição. Na figura 10 pode ser vista a representação dos fasores das correntes de fuga das buchas.



**Figura 10 - Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória (em verde), para uma dada condição inicial.**

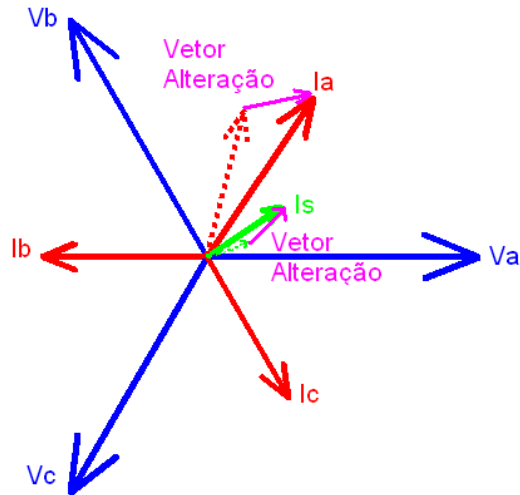
Quando uma das buchas entra em processo de deterioração, os parâmetros do seu isolamento e o fator de potência sofrerão alterações e, assim, a corrente somatória irá desviar do seu valor inicial.

No caso da deterioração de apenas uma das buchas, haverá alteração apenas na corrente de fuga correspondente àquela bucha e conseqüentemente, na corrente soma, descrita na equação 3.1

$$I_s = I_a + I_b + I_c \quad (3.1)$$

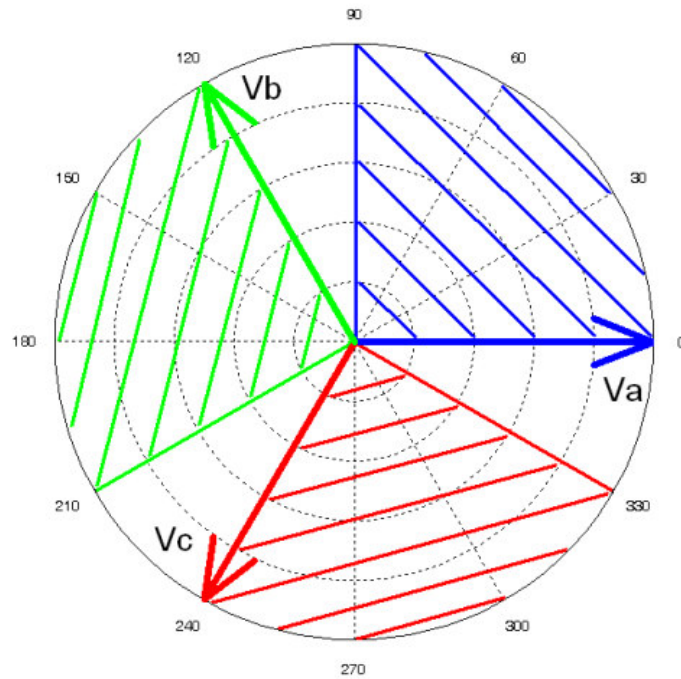
Supondo que duas buchas permaneçam inalteradas, pode-se afirmar que o vetor alteração na corrente soma é igual ao da variação na corrente da fase da bucha deteriorada, ou seja,  $\Delta I_a = \Delta I_s$  (supondo alteração na bucha da fase  $a$ ). Na

figura 11 pode ser vista a representação dos fasores das correntes de fuga das buchas.



**Figura 11 - Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória, com alteração na capacitância e fator de potência da fase A.**

Para ilustrar o que ocorre com o fasor da corrente resultante quando apenas uma bucha se deteriora, têm-se na figura 12 o diagrama fasorial representando as regiões de localização cujo o fasor da corrente resultante estará restrito, ou seja, os quadrantes correspondentes a cada fase. Para a bucha da fase *a*, a resultante estará restrita ao quadrante azul ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ), por exemplo. Observa-se também nesta figura que nas condições ideais supostas, a corrente resultante não poderia ser encontrada em determinados setores de  $30^\circ$  de arco. No entanto, desequilíbrios de tensão e variação simultânea dos estados de duas ou três buchas podem produzir resultantes exatamente nestes setores.



**Figura 12 - Diagrama fasorial ilustrando as regiões de localização da corrente resultante para degradação de apenas uma fase**

Medindo-se o valor do vetor de variação da corrente  $I_a$ , é possível calcular a variação nos parâmetros da bucha deteriorada, como variação do fator de potência, capacitância e resistência interna da bucha.

Sendo o circuito da bucha, um paralelo  $R_1 || C_1$ , onde onde  $R_1$  e  $C_1$  são os valores do modelo equivalente paralelo quando do comissionamento [5], pode-se expressar o vetor da corrente  $I_a$  através das equações 3.2 a 3.5

$$\vec{I}_a = \vec{I}_a^R + \vec{I}_a^C \quad (3.2)$$

$$\vec{I}_a^R = \frac{V_a}{R_1} \quad (3.3)$$

$$\vec{I}_a^C = j\omega C_1 V_a \quad (3.4)$$

$$\vec{I}_a = \frac{V_a}{R_1} + j\omega C_1 V_a \quad (3.5)$$

onde  $\omega$  é a frequência fundamental da rede.

Decompondo-se o vetor alteração em componente resistiva  $\Delta I_a^R$ , e componente capacitiva  $\Delta I_a^C$ , chega-se às equações 3.6 e 3.7

$$I_a^R = \frac{V_a}{R_1} \longrightarrow \frac{\partial I_a^R}{\partial R_1} = -\frac{V_a}{R_1^2} \longrightarrow \Delta R_1 = -\frac{\Delta I_a^R R_1^2}{V_a} \quad (3.6)$$

$$I_a^C = \omega C_1 V_a \longrightarrow \frac{\partial I_a^C}{\partial C_1} = \omega V_a \longrightarrow \Delta C_1 = \frac{\Delta I_a^C}{\omega V_a} \quad (3.7)$$

O fator de potência é obtido pela equação 2.3, visto anteriormente na seção 2.3,  $fp(R_1, C_1) = \cos[\tan^{-1}(\omega R_1 C_1)]$  que pode ser simplificado como na equação 3.8

$$fp(R_1, C_1) = \frac{1}{\sqrt{(\omega R_1 C_1)^2 + 1}} \quad (3.8)$$

Calculando-se a variação do fator de potência a partir da variação da componente resistiva da corrente  $I_a$ , obtém-se a equação 3.9

$$\frac{\partial I_a^R}{\partial fp} = \frac{\partial I_a}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial fp} = -\frac{V_a - [(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}}{R_1^2 \omega^2 R_1 C_1^2} \quad (3.9)$$

logo, tem-se como resultado a equação 3.10

$$\Delta fp = \Delta I_a^R \frac{\omega^2 R_1^3 C_1^2}{V_a [(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}} \quad (3.10)$$

E, de outra forma, calculando-se a variação do fator de potência a partir da variação da componente capacitiva da corrente  $I_a$ , tem-se a relação representada pela equação 3.11

$$\frac{\partial I_a^C}{\partial fp} = \frac{\partial I_a}{\partial C_1} \frac{\partial C_1}{\partial fp} = \omega V_a \frac{-[(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}}{\omega^2 R_1^2 C_1} \quad (3.11)$$

logo, tem-se como resultado a equação 3.12

$$\Delta fp = -\Delta I_a^C \frac{\omega^2 R_1^2 C_1}{\omega V_a [(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}} \quad (3.12)$$

A partir das equações desenvolvidas, é possível determinar a variação dos parâmetros característicos da bucha e, assim, identificar o estado do equipamento. Caso haja um significativo incremento de algum parâmetro, chega-se a definição de que a bucha sofreu algum tipo de alteração.

### 3.3 - Sensoriamento Proposto

Este sistema de monitoramento é composto de um sensor capacitivo conectado entre o *tap* da bucha e o terminal de terra. As variáveis elétricas são adquiridas em tempo real por um computador, que executa monitoramento *online* do estado de conservação de buchas através da estimação instantânea dos parâmetros elétricos do equipamento, ou seja, seu fator de potência ( $fp$ ), sua capacitância ( $C_1$ ) e resistência do dielétrico ( $R_1$ ).

Neste método proposto minimiza-se o efeito de  $C_2$  através de um capacitor  $C$  conectado ao terminal  $tap$ , o qual drena a maior parte da corrente de fuga ( $I$ ) do isolamento da bucha, e mede-se, também, o nível de tensão do terminal  $tap$  ( $\vec{V}_{tap}$ ).

O circuito relativo ao método proposto é mostrado na figura 13, que consiste em monitorar  $C_1$  e  $R_1$ . O valor de  $C$  é ajustado para que  $\vec{V}_{tap}$  inicial seja compatível com a medição, como será visto na seção 4.3.

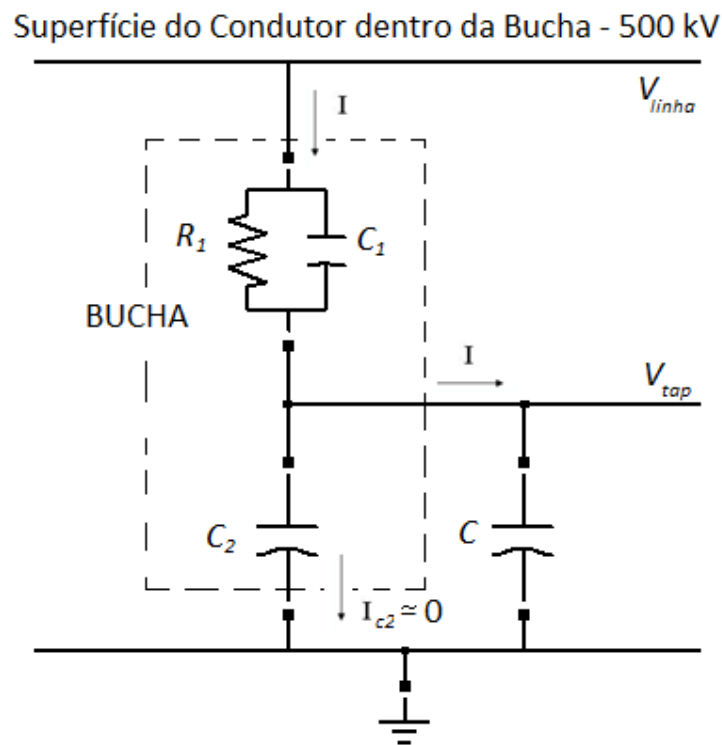


Figura 13 - Bucha com sensor capacitivo.

Como mencionado na seção 3.3, pode-se representar a bucha como um divisor capacitivo. E a partir desta conclusão, iremos equacionar o circuito

representado pela figura 13 para se chegar a uma relação de  $\vec{V}_{tap}$  e  $\vec{V}_{linha}$ . A equação 3.14 ilustra isto

$$V_{tap} = \frac{1/j\omega C}{\left[\left(1/j\omega C_1\right) // R_1\right] + 1/j\omega C} V_{linha} \quad (3.14)$$

Resolvendo a equação 3.14, chega-se as relações de módulo e ângulo para  $\vec{V}_{tap}$ , que são encontradas nas equações de 3.15 e 3.16

$$V_{tap} = \frac{\sqrt{(\omega R_1 C_1)^2 + 1}}{\sqrt{\omega R_1 (C_1 + C)^2 + 1}} V_{linha} \quad (3.15)$$

$$\theta_{vtap} = \frac{180}{\pi} \{ \tan^{-1}(\omega R_1 C_1) - \tan^{-1}[\omega R_1 (C_1 + C)] \} \quad (3.16)$$

Para valores típicos dos parâmetros da bucha e considerando-se o capacitor de desvio  $C$  escolhido adequadamente, as aproximações expressas pelas equações 3.17 e 3.18 são válidas

$$C \gg C_1 \quad (3.17)$$

$$(\omega R_1 C)^2 \gg 1 \quad (3.18)$$

Aplicando-se as aproximações 3.17 e 3.18 nas equações 3.15 e 3.16, as relações de módulo e ângulo ficam expressas pelas equações 3.19 e 3.20

$$V_{tap} = \frac{\sqrt{(\omega R_1 C_1)^2 + 1}}{\sqrt{(\omega R_1 C)^2}} V_{linha} \quad (3.19)$$

$$\theta_{vtap} = \tan^{-1}(\omega R_1 C_1) - \pi/2, \text{ em radianos} \quad (3.20)$$

Resolvendo as equações 3.20 e 3.21 para  $R_1$  e  $C_1$  encontra-se as relações 3.21 e 3.22

$$R_1 = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{m^2 + 1 - k}{k}} \quad (3.21)$$

$$C_1 = \frac{m}{\omega R_1} \quad (3.22)$$

onde  $\omega$  é a frequência da rede ( $\cong 377$  rad/s),  $m = \tan(\theta_{vtap} + \pi/2)$  e

$$k = \left( \frac{V_{tap}}{V_{linha}} \right)^2.$$

O fator de potência da bucha, como mostrado na seção 2.3 é obtido pela equação 2.3,  $fp = \cos[\tan^{-1}(\omega R_1 C_1)]$ . Através da equação 3.20 pode-se retirar uma nova expressão para o cálculo do fator de potência, relacionado-a com a expressão 2.3, expressa pelas equações 3.23 e 3.24

$$\tan^{-1}(\omega R_1 C_1) = \theta_{vtap} + \pi/2 \quad (3.23)$$

$$fp = \cos[\tan^{-1}(\omega R_1 C_1)] = \cos(\theta_{vtap} + \pi/2) \quad (3.24)$$

O sistema desenvolvido propõe uma medição *on-line* desses parâmetros para trafos monofásicos, através da corrente de fuga adquirida pelo sensor capacitivo.



# Capítulo 4

---

## Simulações e Comparações entre Métodos

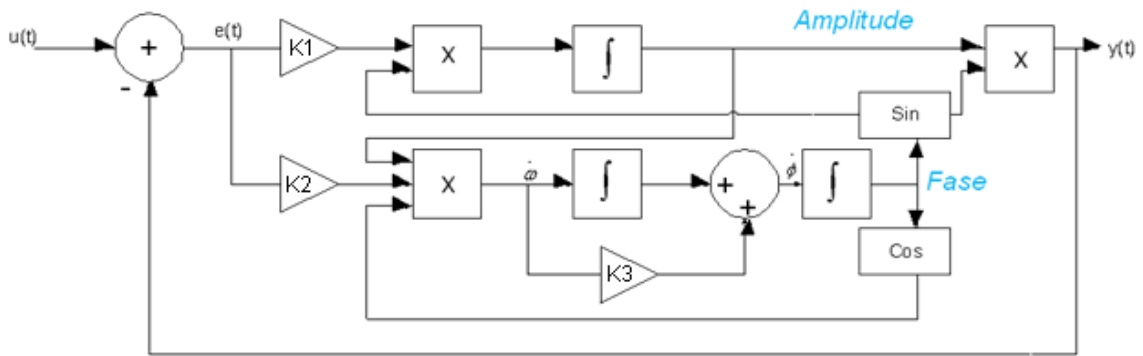
### 4.1 - Descrição

Como visto no capítulo 3, é possível obter, tanto no método somatórios das correntes de fase como no sensoriamento proposto, relações para se calcular os valores dos parâmetros de interesse,  $R_1$ ,  $C_1$  e  $fp$ , sendo preciso apenas a aquisição dos sinais  $V_{linha}$  e  $V_{tap}$ , já que foi definido previamente o valor do sensor capacitivo  $C$ .

A simulação ocorre no software *Simulink/MatLab*, onde a bucha foi eletricamente modelada e os cálculos dos parâmetros são relacionados através de um diagrama de blocos, desenvolvido a partir das equações detalhadas no capítulo 3.

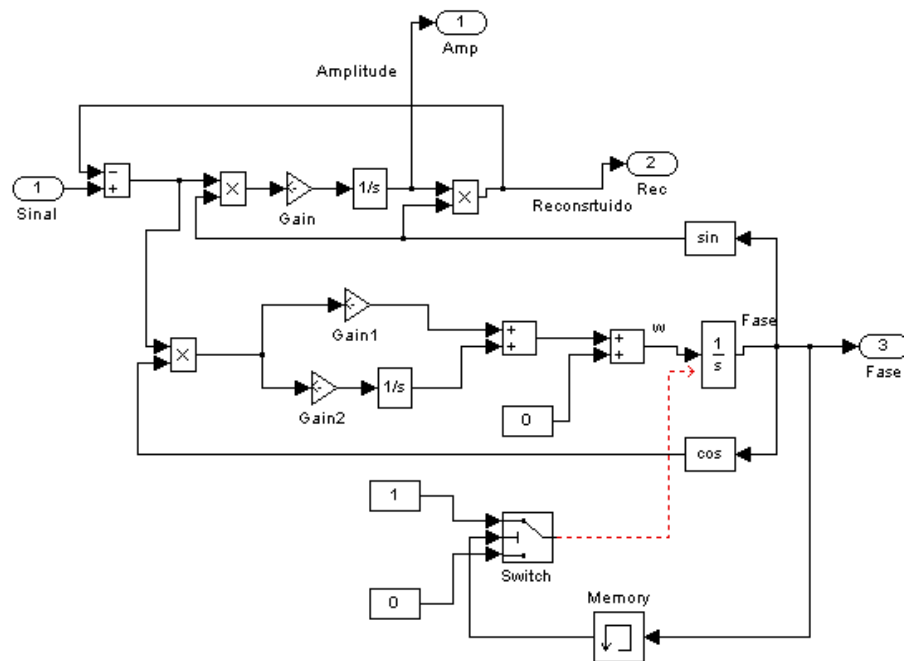
### 4.2 – *Phase-locked loop* (PLL)

Para que a realização dos cálculos fosse possível, foi implementado o algoritmo proposto por Karimi [12] cujo diagrama de blocos encontra-se na figura 14.



**Figura 14 - Diagrama de blocos do PLL proposto por Karimi.**  
**Fonte: Adaptado de “Robust and Frequency-Adaptive Measurement of Peak Value”[13]**

Dessa forma, foi implementado um bloco em *Simulink* para este PLL, cuja função é obter um sinal sincronizado com a frequência fundamental da entrada e com mesma amplitude. O modelo mencionado encontra-se na figura 15.



**Figura 15 - Modelo do Simulink do PLL proposto por Karimi.**

### 4.3 - Sensoriamento Proposto

Para realizar a simulação foram utilizadas especificações fornecidas pela Eletronorte, como fator de potência 0.2 e corrente de fuga próxima de 100 mA<sub>RMS</sub>, valores esses de uma bucha nova, recém saída de fábrica. Desta forma, os parâmetros para uma tensão de rede de 127 V<sub>RMS</sub>, foram calculados, e seus valores encontram-se descritos pelas equações 4.1 a 4.3

$$I = \cos(\theta) * 100m + i * \sin(\theta) * 100m = (20m + i * 97.98m)A_{RMS} \quad (4.1)$$

$$R_1 = V_{RMS} / 20m = 6350 \Omega \quad (4.2)$$

$$C_1 = 97.98m / (377 * V_{RMS}) = 2.05 \mu F \quad (4.3)$$

Como iremos comparar a simulação com um teste realizado em bancada, foram adotados valores comerciais para os elementos  $C_1$  e  $R_1$ , que são

$$R_1 = 6800 \Omega$$

$$C_1 = 2 \mu F$$

que implica no fator de potência encontrado na equação 4.4 [1]

$$fp = \cos[\text{atan}(\omega R_1 C_1)] = 0.191 \quad (4.4)$$

O valor do sensor  $C$  foi ajustado de forma a obter-se uma tensão  $\vec{V}_{tap}$  viável para sua medição, durante o ensaio em protótipo de bancada, como veremos na

seção 5.4. Dessa forma, foi calculado o valor de 500  $\mu\text{F}$  para o sensor capacitivo, o que retorna um valor esperado para o sinal *tap* próximo a 0.8 V de amplitude

$$V_{tap} = \frac{1/C}{1/C_1 + 1/C} V_{linha_{RMS}} = 0.5 V_{RMS} = 0.72 V \quad (4.5)$$

Como detalhado sobre o método de sensoriamento proposto no item 3.3, através de aproximações e simplificações, chega-se a equações que fornecem como resultados parâmetros para realizar o monitoramento da bucha, são eles: a capacitância  $C_1$ , a resistência de perdas  $R_1$  e o fator de potência  $fp$ . Assim, essas equações foram transpostas para diagrama de blocos do *Simulink*, como pode ser visto na figura 16.

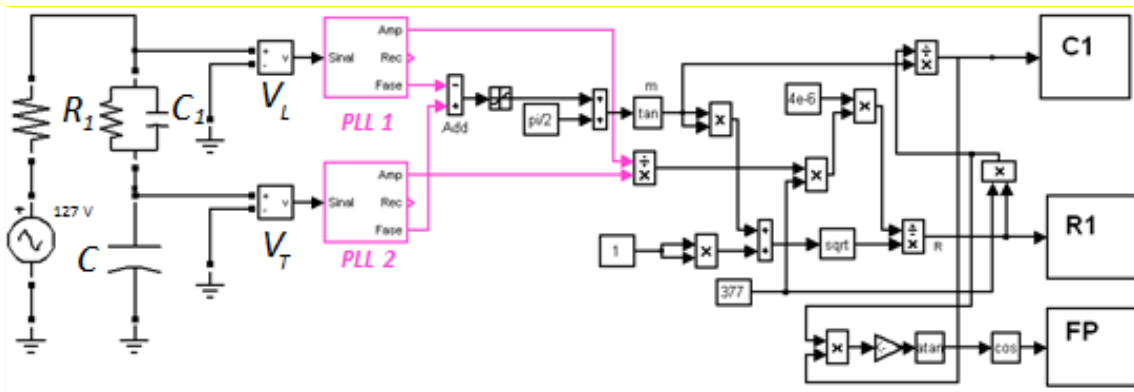
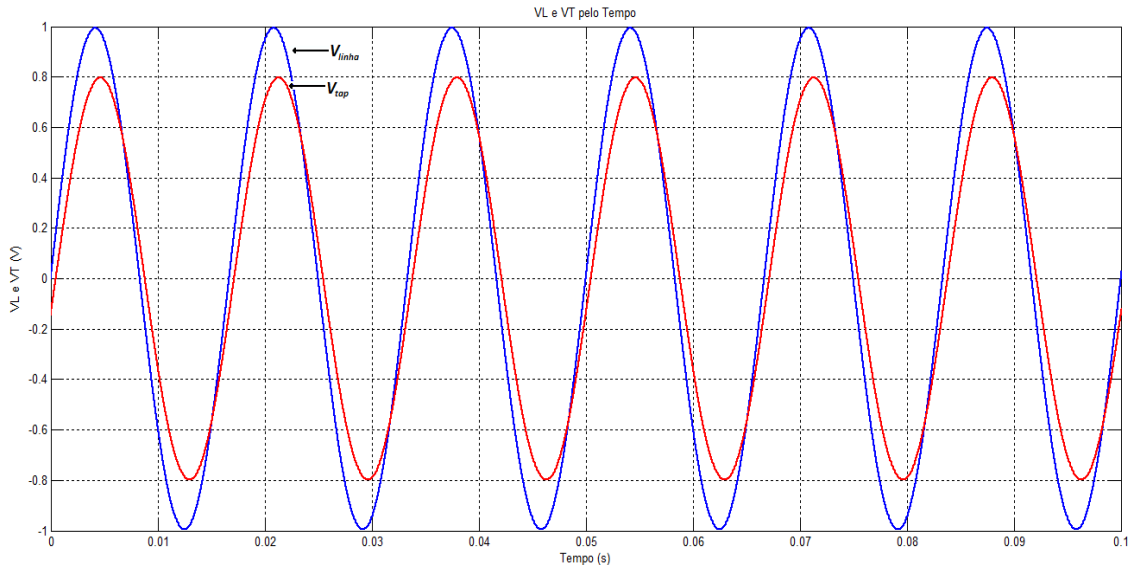


Figura 16 - Diagrama de blocos da simulação do método de Sensoriamento Proposto.

Pela figura 16 pode ser observado que os sinais  $V_{linha}$  e  $V_{tap}$  são adquiridos do modelo elétrico da bucha e enviados para os blocos PLL1 e PLL2, cujo funcionamento foi descrito no item 4.2. No bloco PLL, o sinal é decomposto em amplitude e fase. Os blocos  $C_1$ ,  $R_1$  e  $fp$  exibem os resultados.

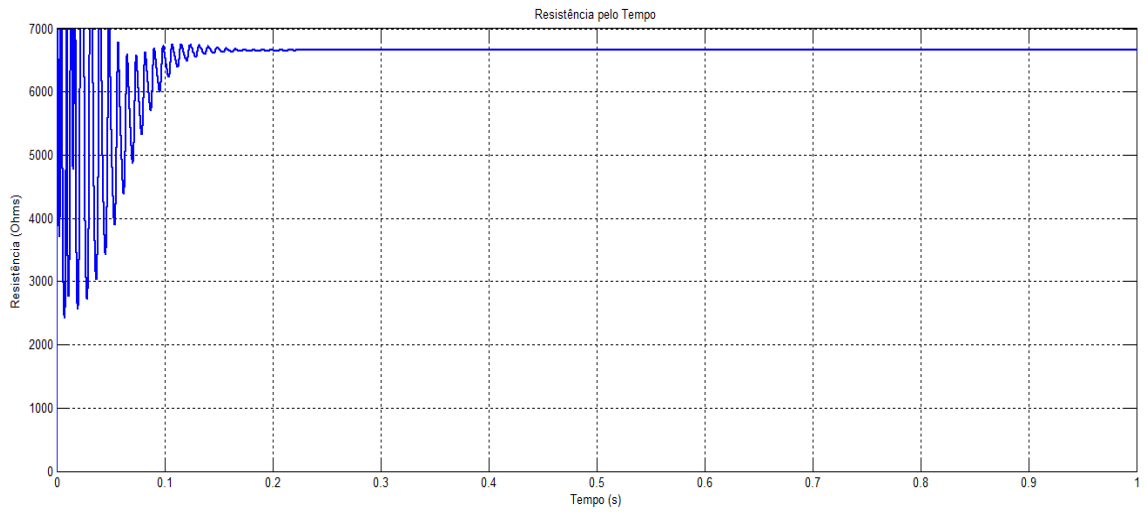
Na figura 17 podemos visualizar os sinais  $V_{tap}$  (vermelho) e  $V_{linha}$  (azul). Nota-se ainda que os sinais estão defasados um do outro, isso se deve a configuração do circuito da bucha.



**Figura 17 - Sinais  $V_{linha}$  (azul) e  $V_{tap}$  (vermelho) no mesmo gráfico**

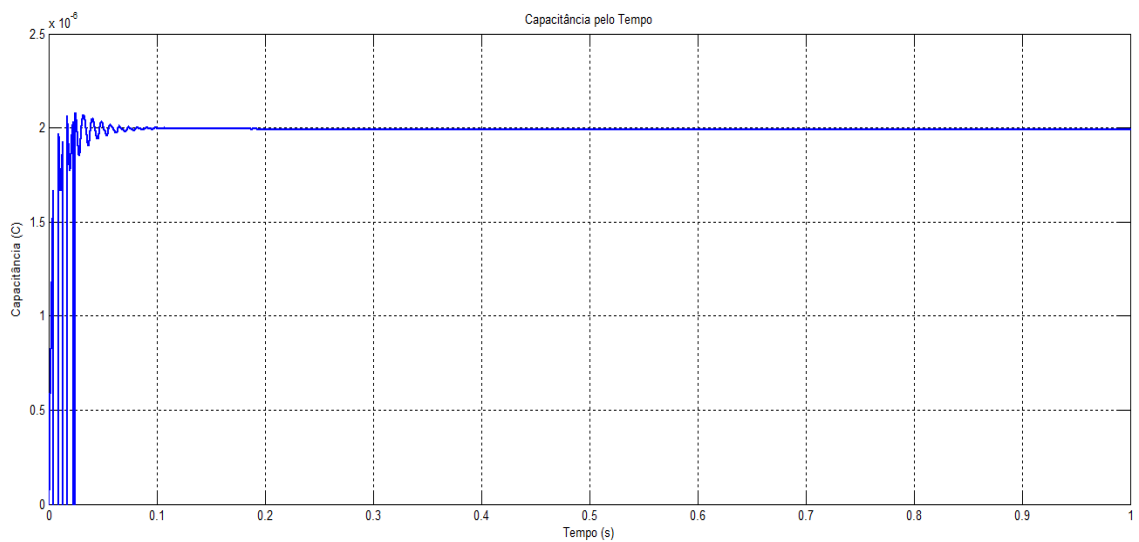
O sinal  $V_{Linha}$  (azul) normalizado, este deveria estar em torno de 180 V, isto é apenas para que o sinal não tenha uma amplitude muito grande na entrada do PLL. Após a saída do PLL, o sinal  $V_{Linha}$  é compensado novamente, voltando à sua amplitude inicial.

Na figura 18, é exibido o resultado para o cálculo da resistência interna da bucha, cujo valor final encontrado foi 6750  $\Omega$ .



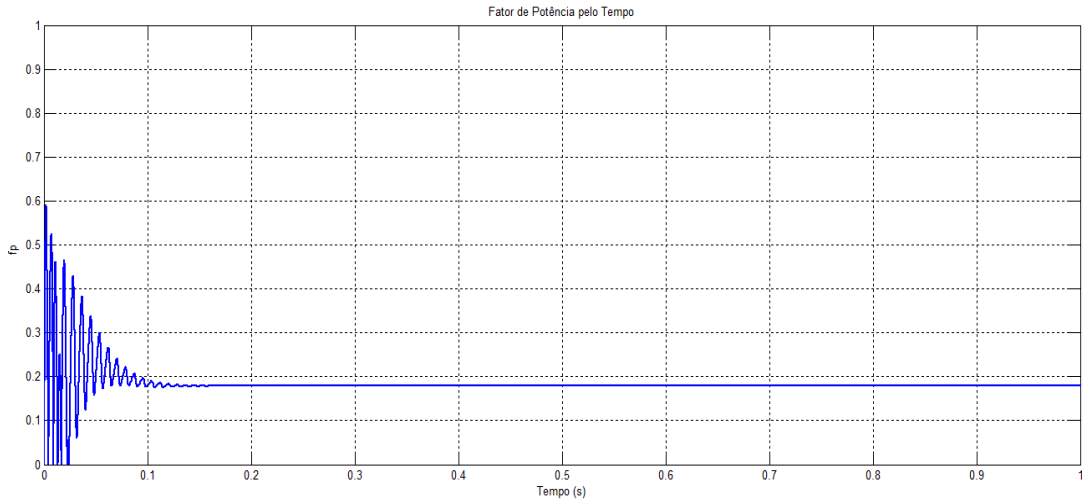
**Figura 18 - Resultado do cálculo da resistência**

Na figura 19, é exibido o resultado para o cálculo da capacitância da bucha, cujo valor final encontrado foi 1.990  $\mu\text{F}$ .



**Figura 19 - Resultado do cálculo da capacitância**

Na figura 20, é exibido o resultado para o cálculo do fator de potência da bucha, cujo valor final encontrado foi 0.192.



**Figura 20 - Resultado do cálculo do fator de potência**

Os resultados para a simulação são apresentados na tabela 1, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Teóricos</b>	<b>Valores Calculados</b>	<b>Discrepância (%)</b>
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	6.8	6.75	0.74
Capacitância - $C_1$ ( $\mu$ F)	2	1.99	0.5
Fator de Potência - $fp$	0.191	0.192	0.52
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.195	0.1975	1.28

**Tabela 1 – Resultados da simulação do método de sensoriamento proposto para uma bucha nova**

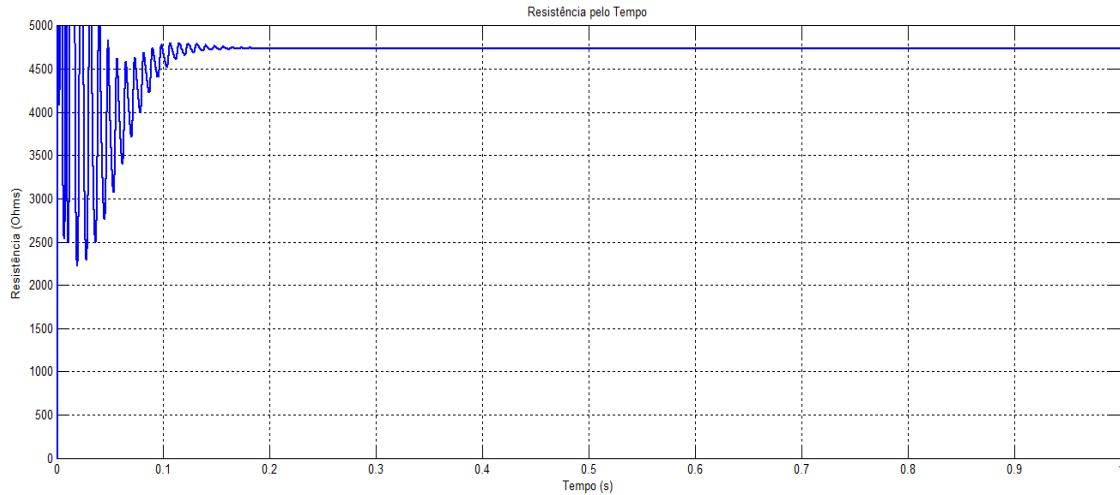
Realizou-se também uma simulação com uma pequena alteração nos parâmetros da bucha, de modo a caracterizar uma degradação da mesma, para os valores:

$$R1 = 4700 \text{ M}\Omega$$

$$C1 = 4.4 \text{ }\mu\text{F}$$

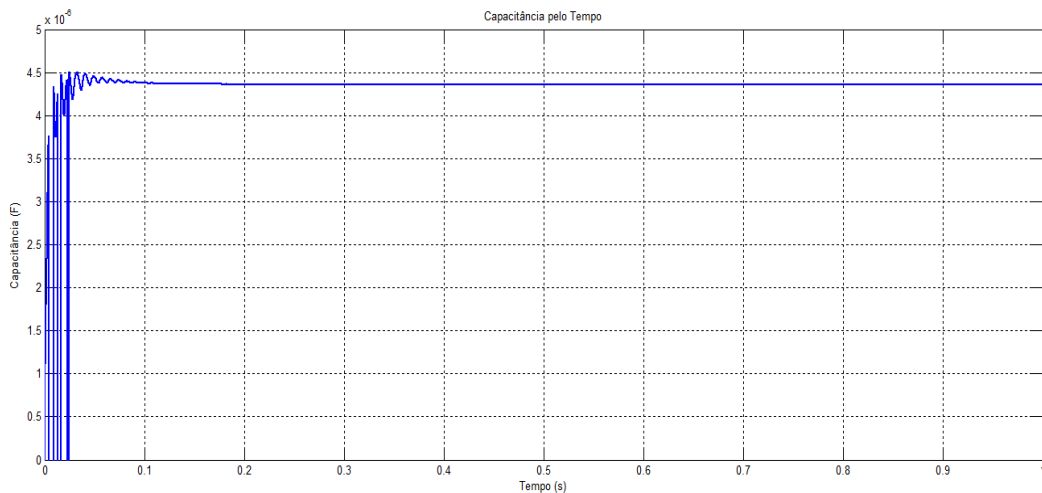
Desse modo, o fator de potência calculado conforme a equação 4.4, será de 0.127.

Na figura 21, é exibido o resultado para o cálculo da resistência interna da bucha, cujo valor final encontrado foi 4750  $\Omega$ .



**Figura 21 - Resultado do cálculo da resistência**

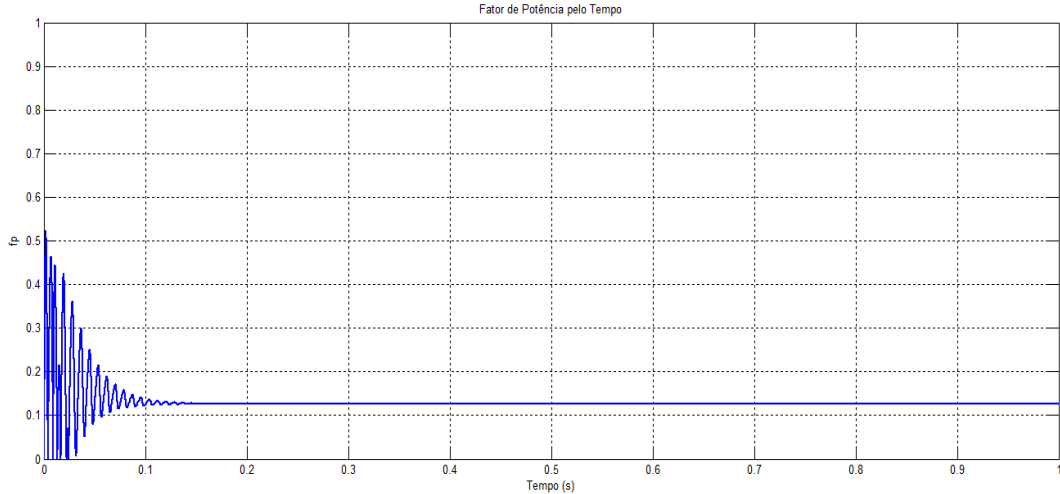
Na figura 22, é exibido o resultado para o cálculo da capacitância da bucha, cujo valor final encontrado foi 4.45  $\mu\text{F}$ .



**Figura 22 - Resultado do cálculo da capacitância**



Na figura 23, é exibido o resultado para o cálculo do fator de potência da bucha, cujo valor final encontrado foi 0.126.



**Figura 23 – Resultado do cálculo do fator de potência**

Os resultados para a simulação são apresentados na tabela 2, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Teóricos</b>	<b>Valores Calculados</b>	<b>Discrepância (%)</b>
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	4.7	4.75	1.05
Capacitância - $C_1$ ( $\mu$ F)	4.4	4.45	1.12
Fator de Potência - $fp$	0.127	0.125	1.6
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.1283	0.1255	2.18

**Tabela 2 - Resultados da simulação do método de sensoriamento proposto para uma bucha degradada**

#### 4.4 - Somatório das Correntes de Fase

Como detalhado no item 3.2, através de equações consegue-se calcular a variação dos parâmetros de uma das buchas de um trafo trifásico.

Para realizar a simulação foram utilizados os mesmo valores calculados no item 4.3. Que são:

$$R1 = 6800 \Omega$$

$$C1 = 2,0 \mu F$$

$$C = 500 \mu F$$

Que resulta em um fator de potência de 0.191.

Na figura 24, pode-se ver o esquemático da simulação, onde uma fonte alimenta três buchas, cada uma ligada a uma fase. Há um amperímetro conectado apenas à fase  $a$  e outro ligado à junção das três buchas, para medir a corrente total. Os sinais são adquiridos do modelo elétrico e enviados para os blocos PLL1 e PLL2, cujo funcionamento foi descrito no item 4.2. No bloco PLL, o sinal é decomposto em amplitude e fase. Os blocos Re1, Im1, ReT e ImT exibem os resultados, que para esta simulação foram o módulo e a fase das correntes.

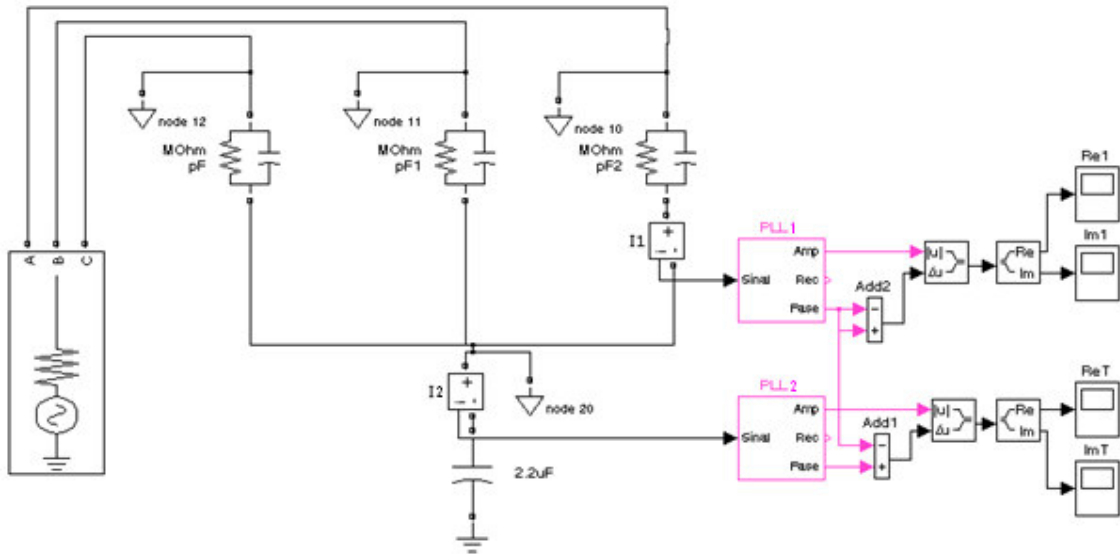


Figura 24 – Diagrama de blocos da simulação do método de Somatório das Correntes de Fase

Na simulação realizada, inicialmente as três buchas possuíam os parâmetros  $R1$  e  $C1$  iguais. O que resulta em uma corrente resultante da soma das três fases igual a zero.

$$I_t = 0 \angle 0^\circ$$

Depois foram alterados apenas os parâmetros da bucha da fase  $\alpha$ , conforme realizado na simulação no item 4.3, para:

$$R1 = 4700 \Omega$$

$$C1 = 4.4 \mu F$$

Que resulta em um fator de potência de 0.127 e que gerou uma corrente soma de:

$$I_t = 0.1468 \angle 85.93^\circ$$

Desta maneira, realizando-se os cálculos, consegue-se mensurar quantitativamente quanto os parâmetros da bucha variaram. Para o cálculo da resistência, utilizando-se a equação 3.2, tem-se a variação da equação 4.6.

$$\Delta R_1 = -\frac{\Delta I_a^R R_1^2}{V_a} = -2.88 \text{ k}\Omega \quad (4.6)$$

Desta forma, o parâmetro  $R_1$ , correspondente à bucha degradada, calculado por este método é representado pela equação 4.7.

$$R'_1 = R_1 + \Delta R_1 = 6800 + (-2880) = 3920 \text{ }\Omega \quad (4.7)$$

Para o cálculo da capacitância, utilizando-se a equação 3.3, tem-se a variação da equação 4.8.

$$\Delta C_1 = \frac{\Delta I_a^C}{\omega V_a} = 2.36 \text{ }\mu F \quad (4.8)$$

Desta forma, o parâmetro  $C_1$ , correspondente à capacitância de perdas, calculado pelo método encontra-se na equação 4.9.

$$C'_1 = C_1 + \Delta C_1 = 2\mu + 2.36\mu = 4.36 \text{ }\mu F \quad (4.9)$$

Para o cálculo do fator de potência, utilizando-se a equação 3.11, tem-se a variação da equação 4.10.

$$\Delta fp = \Delta I_a^R \frac{\omega^2 R_1^3 C_1^2}{V_a [(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}} = 0.078 \quad (4.10)$$

Desta forma, o fator de potência calculado pelo método é:

$$fp' = fp + \Delta fp = 0.19 + 0.078 = 0.268$$

Os resultados para a simulação são apresentados na tabela 3, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Teóricos</b>	<b>Valores Calculados</b>	<b>Discrepância (%)</b>
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	4.7	3.92	19.89
Capacitância - $C_1$ ( $\mu$ F)	4.4	4.36	0.92
Fator de Potência - $fp$	0.127	0.268	52.6
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.1283	0.1552	20.97

**Tabela 3 - Resultados da simulação do método somatório das correntes de fase para uma bucha degradada**

#### **4.5 - Discussão**

O objetivo principal da simulação do método de sensoriamento proposto é realizar corretamente os cálculos dos parâmetros, a partir dos sinais de tensões coletados. Esse objetivo foi cumprido de forma ótima, como pode ser visto nos resultados apresentados nas tabelas 1 e 2. Tanto no caso de uma bucha nova, quanto no caso de uma bucha deteriorada, o sistema rastreou satisfatoriamente os parâmetros.

Em contrapartida, os resultados do método somatório das correntes de fase se mostraram abaixo do esperado. Os cálculos da resistência, do fator de potência e da tangente *delta* apresentaram uma grande discrepância, como pode ser visto na tabela 3. Apenas o cálculo da capacitância obteve um resultado satisfatório.

# Capítulo 5

## Sistema de Medição

### 5.1 - Metodologia

Para sistemas a serem instalados em campo, o sinal de  $V_{\text{linha}}$  é adquirido através do secundário do transformador, o sinal  $V_{\text{tap}}$  do conector *tap* da bucha e o sensor é instalado em série com esta conexão. Pode ser visto na figura 25, um exemplo simplificado do sistema a ser instalado em campo, em um transformador monofásico.

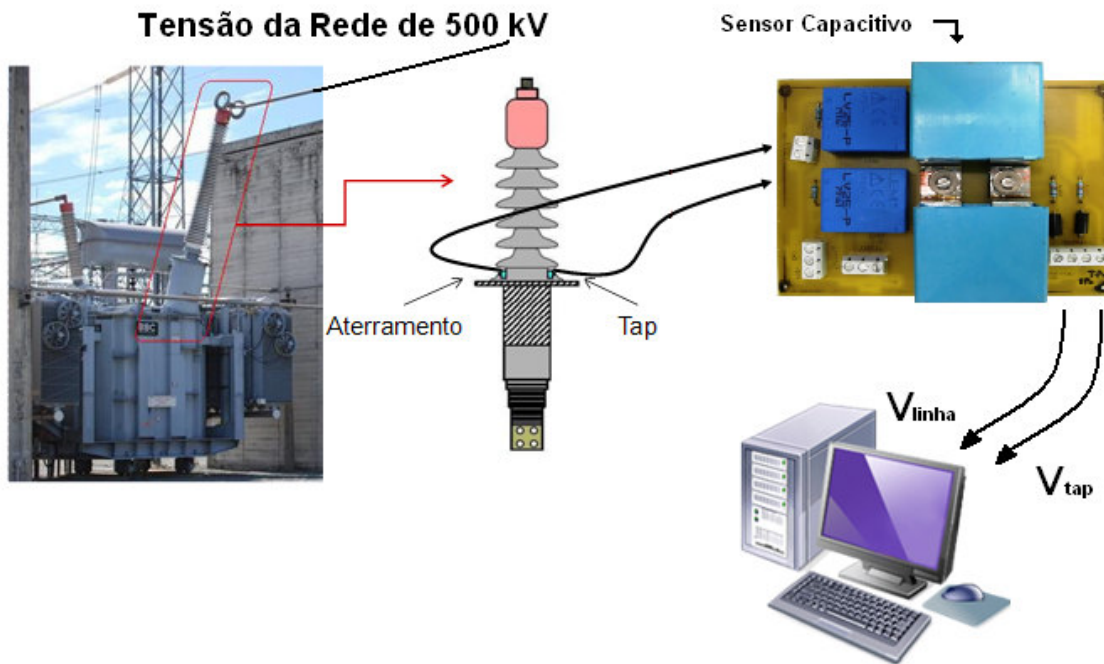


Figura 25 – Esquema simplificado do sistema de aquisição

Para o sistema a ser montado em bancada, o sinal  $V_{linha}$  é retirado da rede, 127  $V_{rms}$ , necessitando apenas ter sua amplitude reduzida, como veremos no decorrer do capítulo.

## 5.2 - Sensor de tensão

Foi utilizado o sensor de tensão da LEM, LV-25P, que pode ser visto na figura 26. Através dele é feita a aquisição do sinal  $V_{linha}$ , pois possui a função de atenuar a amplitude do sinal, de modo a não perder qualidade.

Essa atenuação do sinal é realizada através da escolha de um resistor na entrada do sensor, de forma a quantificar a amplitude do sinal de saída.

E ainda com o intuito de se proteger o equipamento de perturbações da rede, o sensor de tensão possui isolamento galvânica entre o primário e o secundário.

A alimentação do sensor é através de +12 e -12 V.

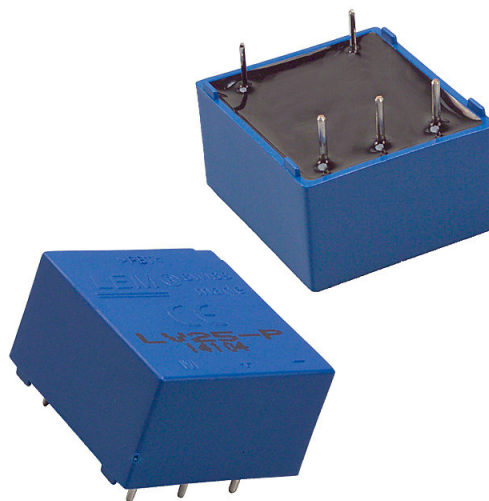


Figura 26 – Sensor de tensão da LEM

### 5.3 - Placa de aquisição

Foi utilizada a placa de aquisição de sinais PCI-1711, figura 27, da fabricante *Advantech* para converter sinais analógicos para integrar ao *Simulink*.

Como característica relevantes dessa placa podemos citar o fato de possuir entradas analógicas de 12 bits com taxa de amostragem de até 100 kHz e faixa de operação de -10 a +10 V.



Figura 27 – Placa de aquisição de sinais utilizada

### 5.4 - Montagem em bancada

Para o sistema ser implantado em protótipo de bancada, foi preciso escalonar os parâmetros da bucha para a tensão de rede,  $127 V_{rms}$ . Dessa maneira, foi preciso primeiro dimensionar os valores dos componentes da bucha,  $R_1$  e  $C_1$ , assim como ocorrido no item 4.3. Dessa maneira, utilizaram-se os mesmo valores adotados anteriormente, extraídos das equações 4.2 e 4.3, que são:



$$R_1 = 6.8 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 2 \mu F$$

Resultando em um fator de potência de 0.191, conforme demonstrado na equação 4.4.

O valor do sensor  $C$  foi ajustado de forma a obter-se uma tensão de  $V_{tap}$  que seja viável sua medição. Ou seja, tais ajustes de amplitude nos sinais *tap* e linha são necessários para garantir o limite de tensão aceito pela placa de aquisição descrita no item 5.3. Dessa forma, calculou-se o sensor para um valor de  $500 \mu F$ , o que retorna um valor para o sinal *tap*  $0.72 \text{ V}$  de amplitude, conforme calculado na equação 4.5.

Para a aquisição do sinal  $V_{linha}$  foi utilizado um sensor de tensão, já descrito no item 5.2. Através dele, mensura-se o sinal  $V_{linha}$  retirado da rede, ajustando o resistor na entrada do sensor, para uma amplitude de  $1 \text{ V}$ .

Para alimentação dos sensores foi utilizada uma fonte para gerar tensões simétricas de  $+12 \text{ V}$  e  $-12 \text{ V}$  visando portabilidade do equipamento de medição.

Para a montagem em bancada foi confeccionada uma placa de circuito impresso cuja finalidade é adquirir os sinais de entrada e normalizar os sinais de saída para a placa de aquisição, que como visto anteriormente, exige um limite de tensão. Na figura 28 é apresentado o *layout* da placa de aquisição.

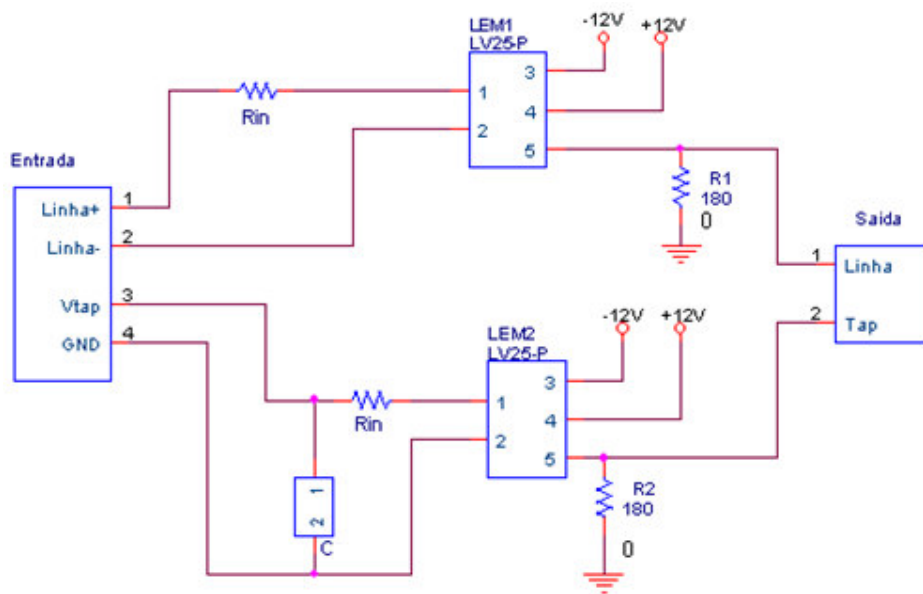


Figura 28 – Circuito esquemático do sistema de medição

Na figura 29 é apresentado o resultado final da placa de aquisição.

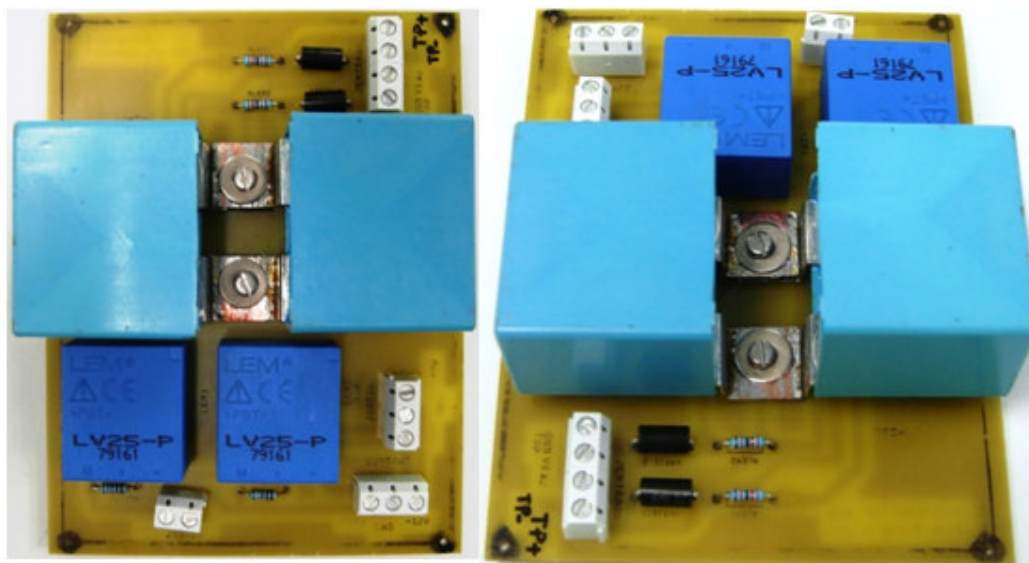
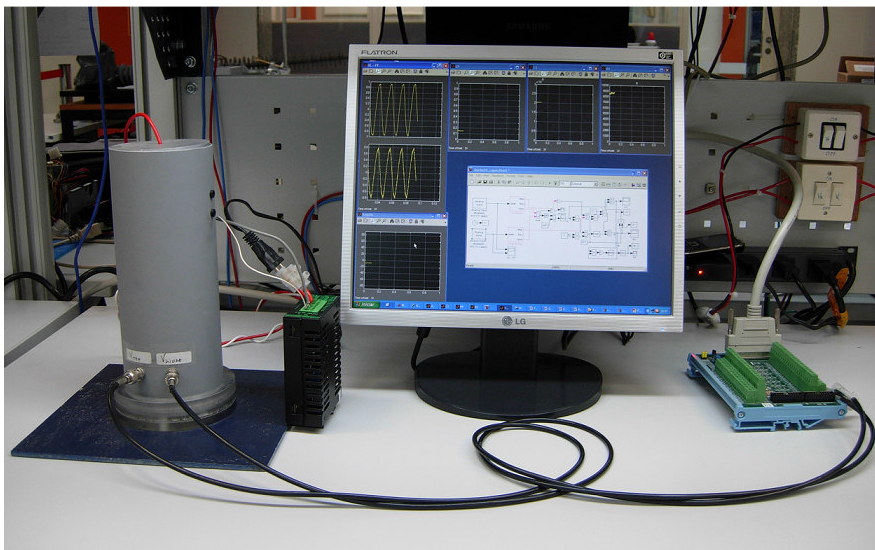


Figura 29 - Placa de aquisição e proteção

Os componentes eletrônicos que integram a placa foram escolhidos de maneira a reduzir o nível de ruído no circuito. Pela figura 27 pode-se visualizar que foram utilizados dois sensores de tensão LV25-P na placa, descritos no item 5.2, um para o sinal coletado no *tap* do modelo da bucha e outro para a tensão de linha. Existem ainda dois capacitores em paralelo que são utilizados como o sensor *C*. Este capacitor é conectado ao terminal *tap*, o qual drena a maior parte da corrente de fuga (*I*) do isolamento da bucha, e mede-se o nível de tensão do terminal *tap* ( $\vec{V}_{tap}$ ), como visto no item 3.3.

Na figura 30 pode ser vista a montagem do sistema em bancada. Na parte direita está a placa de aquisição de sinais conectada ao computador por um cabo SCSI blindado para integração com o ambiente *Simulink*. Na parte a esquerda está a fonte que alimenta o sensor e o tubo de PVC que contém o modelo da bucha e a placa de aquisição. Na tela do computador, são exibidos em tempo real os parâmetros calculados através do software *Simulink*.



**Figura 30– Sistema de medição montado em bancada**

Na figura 31 aparecem com mais detalhes os conectores dos sinais adquiridos do protótipo bucha. Estes sinais são enviados para a placa PCI-1711, que irá digitalizá-los para serem enviados ao computador.

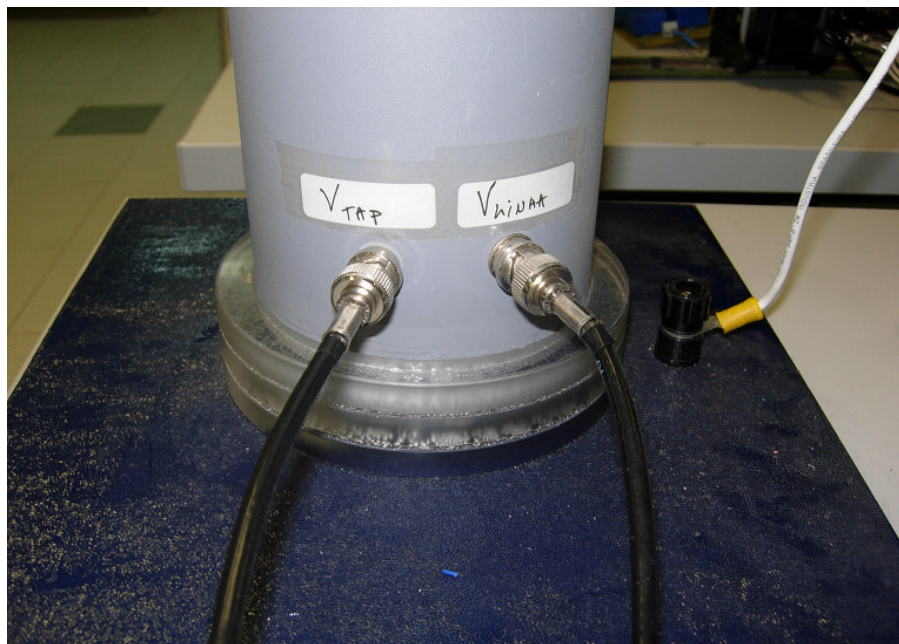
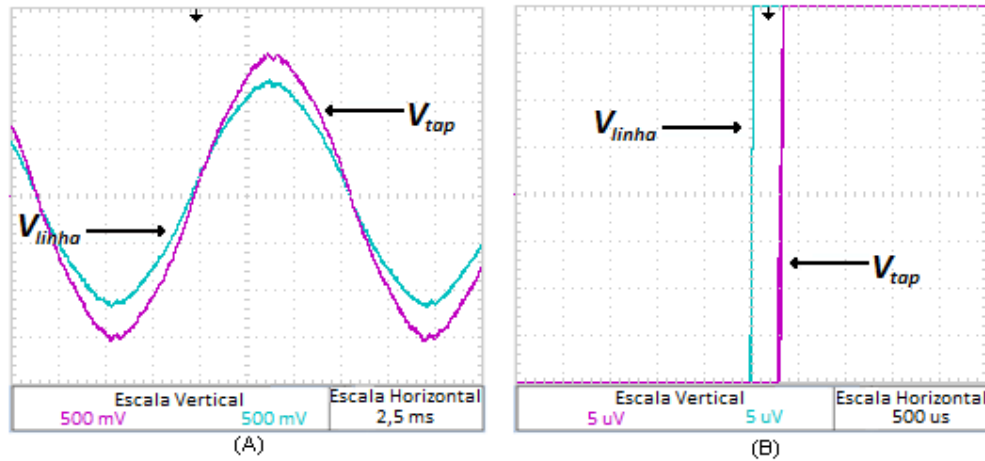


Figura 31 – Detalhe dos conectores BNC

## 5.5 - Resultados

Na figura 32 são apresentados os sinais adquiridos em osciloscópio. Estes sinais foram utilizados em cálculos *offline* com o objetivo de validar o processamento realizado digitalmente.



**Figura 32– Sinais  $V_{Linha}$ (azul) e  $V_{tap}$ (roxo)**  
**(a)Escala horizontal normal (b) Escala horizontal reduzida**

Para o cálculo do fator de potência, analisaram-se os instantes de tempo em que as curvas dos sinais de *tap* e linha, respectivamente, cruzam o eixo das abscissas. Como pode ser visto pela figura 32(b), através dos cursores do osciloscópio, podemos identificar o intervalo de tempo entre os sinais. Obteve-se

$$\Delta t = t_{tap} - t_{Linha} \approx -340 \mu s \quad (5.1)$$

Tendo em vista a frequência de 60Hz da rede, a diferença de fase  $\Delta\delta$  entre os sinais é dada por

$$\Delta\delta = 2\pi * 60 * (-340\mu) = -0.1282 = -7.34^\circ \quad (5.2)$$

Através da expressão 3.24, se obtém o fator de potência da bucha, que é dado por

$$fp = \cos(\Delta\delta + \pi/2) = \cos(-0.1282 + 1.571) = 0.1278 \quad (5.3)$$

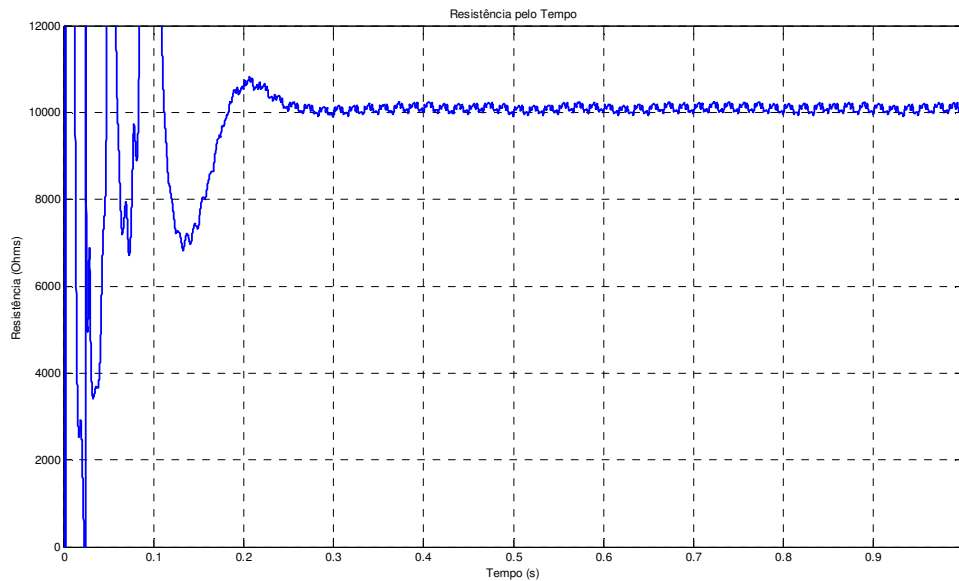
Os cálculos da resistência e capacitância são obtidos através das equações 3.21 e 3.22, onde os valores são exibidos pelas equações 5.4 e 5.5

$$R_1 = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{m^2 + 1 - k}{k}} = 12.28 \Omega \quad (5.4)$$

$$C_1 = \frac{m}{\omega R_1} = 1.89 \mu F \quad (5.5)$$

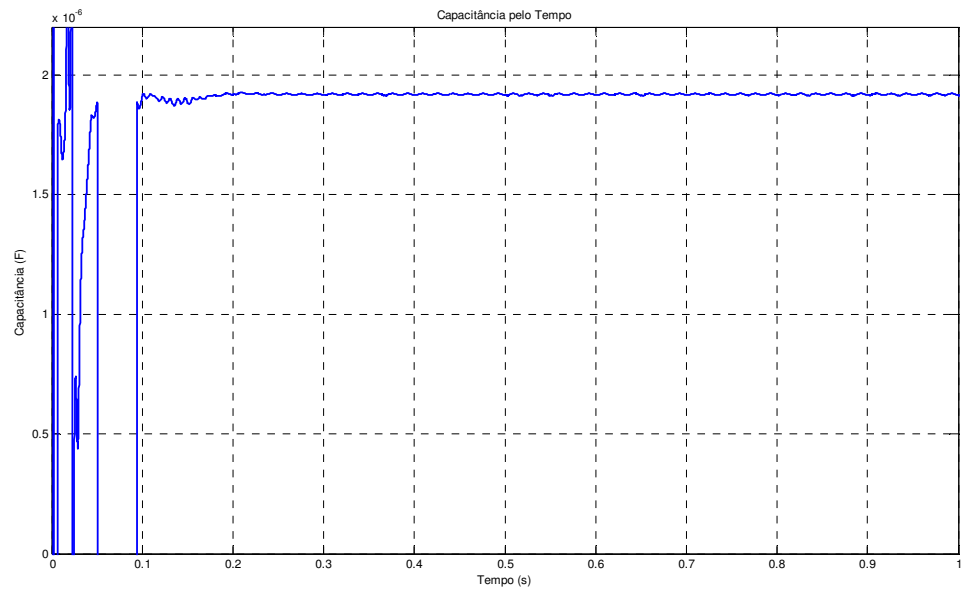
Através do sistema de medição descrito no item 5.4 foram obtidos os resultados para dois tipos de análises, para uma bucha com condições normais de operação e outro resultado para uma bucha com um determinado nível de degradação, conforme realizado na simulação no item 4.3.

Na figura 33, é exibido o resultado para o cálculo da resistência interna da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 10.1 kΩ



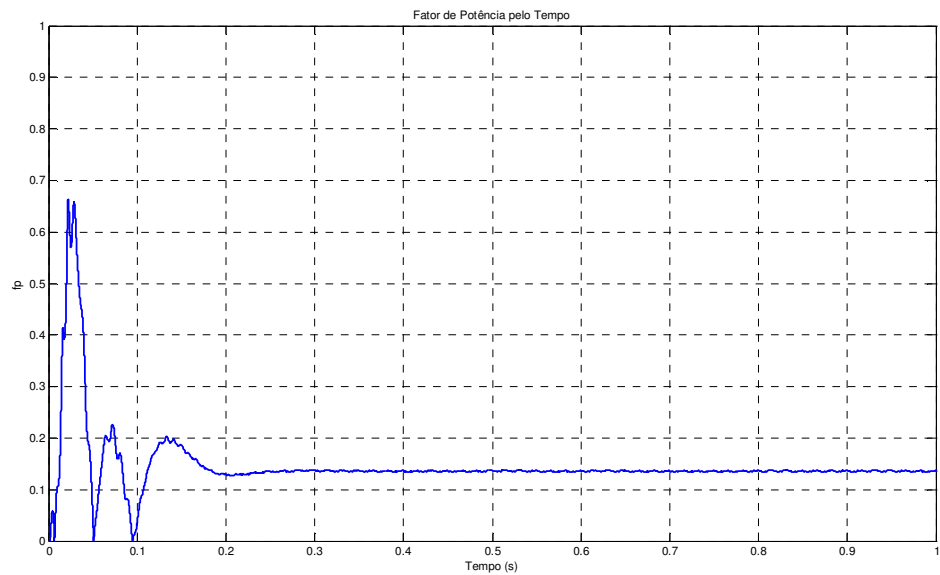
**Figura 33 – Resultado do cálculo da resistência**

Na figura 34, é exibido o resultado para o cálculo da capacitância da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 1.89 μF.



**Figura 34 – Resultado do cálculo da capacitância**

Na figura 35, é exibido o resultado para o cálculo do fator de potência da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 0.133.



**Figura 35 – Resultado do cálculo do fator de potência**

Os resultados obtidos com o protótipo são apresentados na tabela 4, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Nominais</b>	<b>Valores Calculados</b>	<b>Discrepância (%)</b>
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	12.28	10.1	17.75
Capacitância - $C_1$ ( $\mu$ F)	1.9	1.89	0.53
Fator de Potência - $fp$	0.113	0.133	17.70
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.114	0.139	21.93

**Tabela 4 - Resultados do protótipo utilizando o método de sensoriamento proposto para uma bucha nova**

Assim como descrito no item 4.3, também foi realizada um ensaio com uma pequena alteração nos parâmetros da bucha que seriam correspondentes à uma bucha degradada. Onde resistores e capacitores foram colocados em paralelo, para se chegar aos valores:

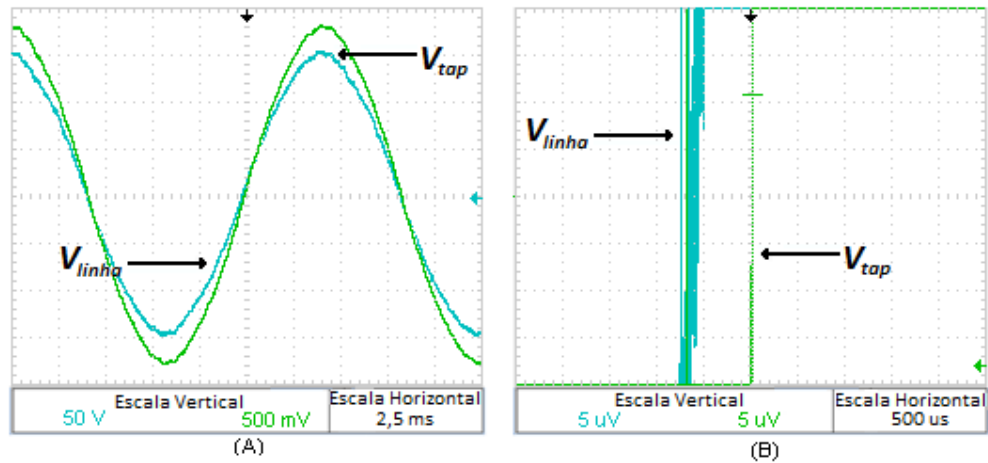
$$R1 = 4700 \text{ M}\Omega$$

$$C1 = 4.4 \text{ }\mu\text{F}$$

A partir desses valores, o fator de potência calculado através da equação 4.4 é 0.127.

Novamente são apresentados os sinais adquiridos em osciloscópio, que são apresentados na figura 36.





**Figura 36 - Sinais  $V_{Linha}$  (azul) e  $V_{tap}$  (verde)**  
**(a) Escala horizontal normal (b) Escala horizontal reduzida**

Como pode ser visto pela figura 36(b), através dos cursores do osciloscópio, podemos identificar o intervalo de tempo entre os sinais. Obteve-se

$$\Delta t = t_{tap} - t_{Linha} \approx -480 \mu s \quad (5.6)$$

Tendo em vista a frequência de 60Hz da rede, a diferença de fase  $\Delta\delta$  entre os sinais é dada por

$$\Delta\delta = 2\pi * 60 * (-480\mu) = -0.1810 = -10.37^\circ \quad (5.7)$$

Através da expressão 3.24, se obtém o fator de potência da bucha, que é dado por

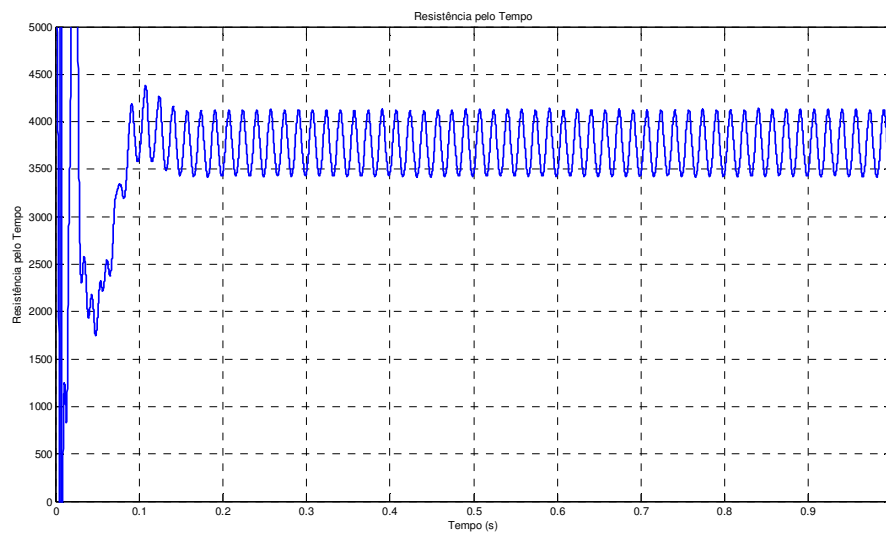
$$fp = \cos(\Delta\delta + \pi/2) = \cos(-0.1810 + 1.571) = 0.18 \quad (5.8)$$

Os cálculos da resistência e capacitância são obtidos através das equações 3.21 e 3.22, onde os valores são exibidos pelas equações 5.9 e 5.10

$$R_1 = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{m^2 + 1 - k}{k}} = 3.48 \Omega \quad (5.9)$$

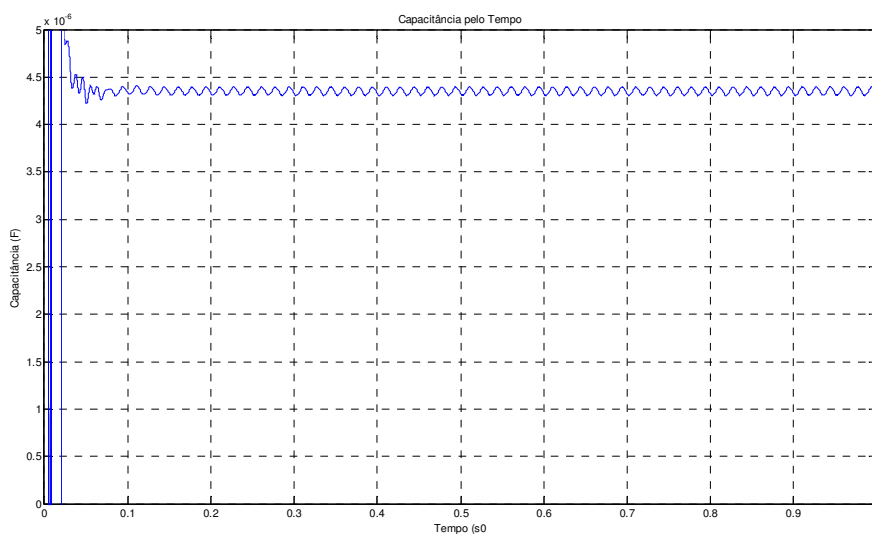
$$C_1 = \frac{m}{\omega R_1} = 4.18 \mu F \quad (5.10)$$

Na figura 37, é exibido o resultado para o cálculo da resistência interna da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 3.74 kΩ.



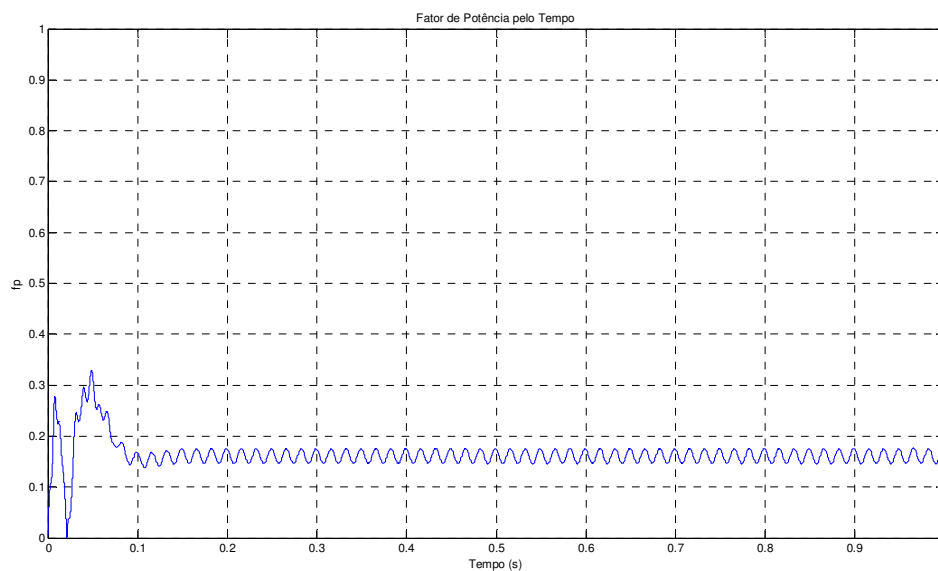
**Figura 37 – Resultado do cálculo da resistência**

Na figura 38, é exibido o resultado para o cálculo da capacitância da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 4.36 μF.



**Figura 38 – Resultado do cálculo da capacitância**

Na figura 39, é exibido o resultado para o cálculo do fator de potência da bucha, cujo valor final encontrado convergiu aproximadamente para 0.165.



**Figura 39 – Resultado do cálculo do fator de potência**

Os resultados obtidos com o protótipo são apresentados na tabela 5, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

Parâmetros	Valores Nominais	Valores Calculados	Discrepância (%)
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	3.48	3.74	7.47
Capacitância - $C_1$ ( $\mu$ F)	4.17	4.36	4.56
Fator de Potência - $fp$	0.18	0.165	8.33
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.183	0.1627	11.09

Tabela 5 - Resultados do protótipo utilizando o método de sensoriamento proposto para uma bucha degradada

## 5.6 - Resultados Experimentais Utilizando o Método do Somatório das Correntes

Assim como realizado nas simulações, onde foram comparados os dois métodos, também foram efetuados ensaios para o método do somatório das correntes em protótipo trifásico em tensão de 127 V<sub>RMS</sub>. Contudo, foram utilizados valores diferentes de resistência e capacitância para modelar o protótipo, devido ao número de elementos disponíveis.

O diagrama do sistema de medição pode ser visto na figura 40.

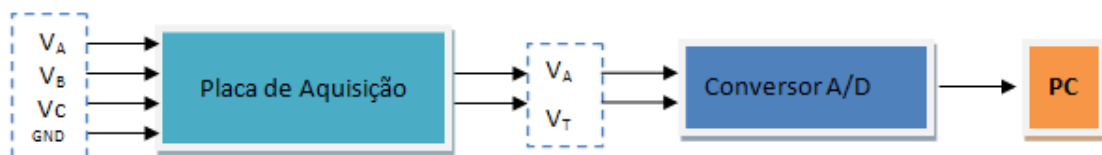


Figura 40 – Diagrama do sistema de medição

O layout da placa de aquisição é apresentado na figura 41.

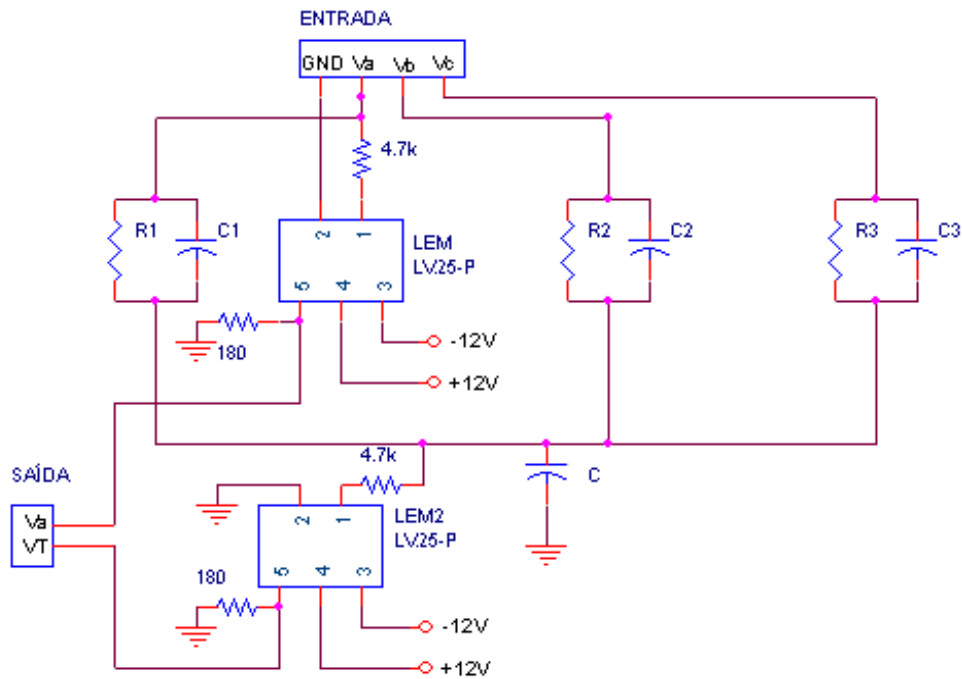
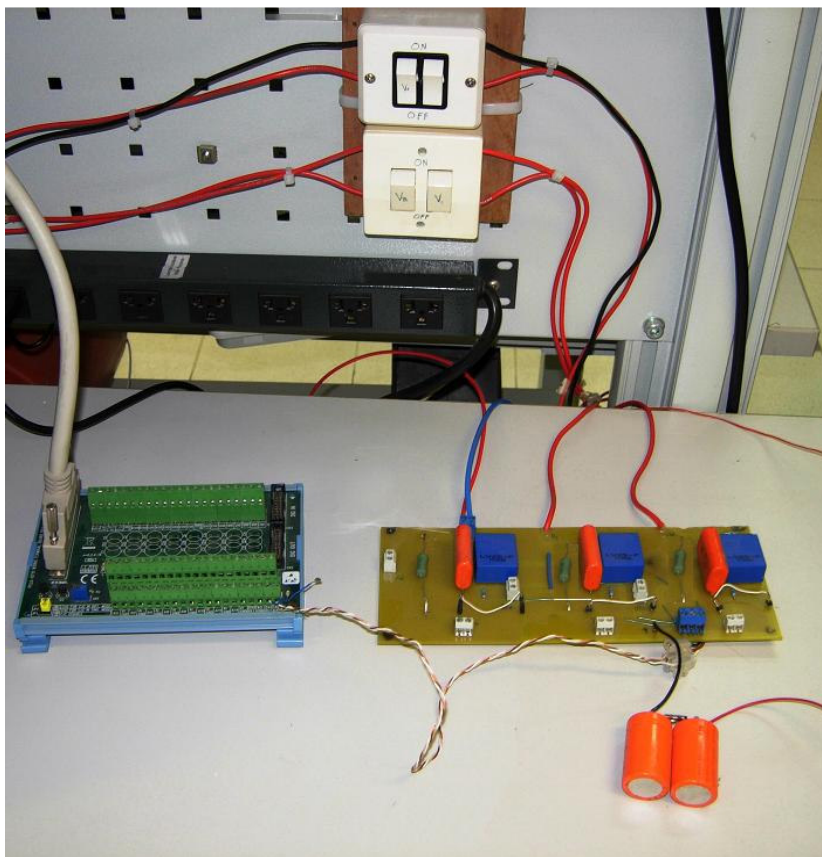


Figura 41 – Circuito esquemático da placa de aquisição

O sistema foi escalonado com as três buchas iguais, mesmos valores nominais de resistência e capacitância, para fornecerem um fator de potência entre 0.2 e 0.3. Para esta condição inicial, os parâmetros utilizados foram  $R_1 = 4700 \Omega$  e  $C_1 = 2.2 \mu F$  (fator de potência igual a 0.249).

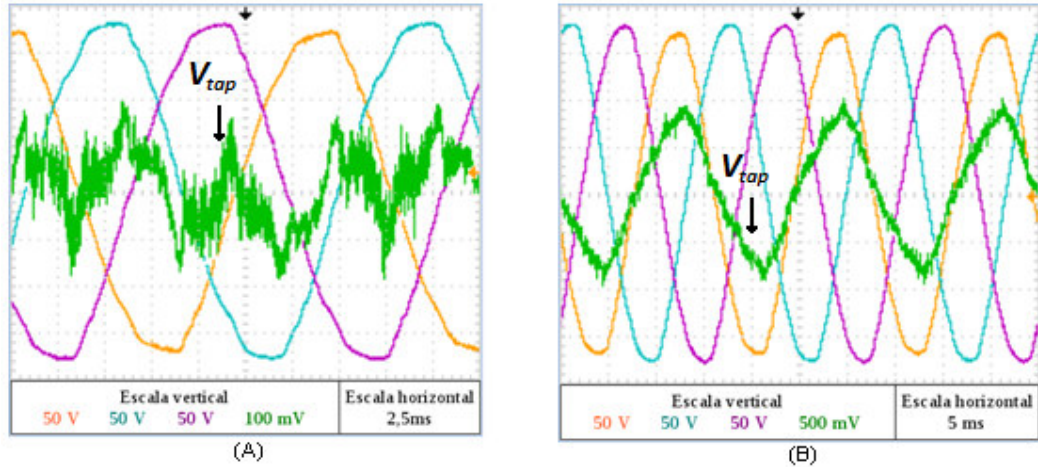
Na figura 42 pode ser vista a montagem do sistema em bancada. Na parte esquerda está a placa de aquisição de sinais conectada ao computador por um cabo SCSI blindado para integração com o ambiente *Simulink*, que irá fazer a leitura dos sinais. Na parte a direita está o modelo das três buchas, que são alimentadas pela tensão da rede.



**Figura 42 – Sistema de medição montado em bancada.**

Inicialmente, a tensão no *tap* pode ser vista na Figura 43(a), na cor verde. Para o teste, alterou-se o modelo da bucha da fase *a*, inserindo em paralelo um capacitor e um resistor. Com isto, os parâmetros modificados assumiram nominalmente os valores:  $R_1 = 2350 \Omega$  e  $C_1 = 4.4 \mu F$  – o fator de potência neste caso é de 0.249. Na Figura 43(b) pode-se ver as 3 fases e a tensão no *tap*, em verde. Observa-se na Figura 43(a) – que retrata o caso em que as três buchas não estão degradadas – que a tensão do *tap* é extremamente distorcida devido ao conteúdo harmônico das tensões. A componente fundamental está, nesta situação,

completamente mascarada dificultando a medida do fasor inicial das somas das correntes.



**Figura 43 – Tensões trifásicas utilizadas no protótipo e a tensão  $TAP$ , em verde (A)Modelando uma bucha nova; (B)Modelando uma bucha degradada**

Através da medição e processamento da corrente soma e da tensão  $V_a$  instantâneas, pelo computador os cálculos para determinação da variação dos parâmetros foram realizados. As operações efetuadas são explicitadas abaixo para melhor entendimento.

A variação da corrente  $I_a$  foi de:

$$I_a = 0,1441 \angle 80.69^\circ$$

e, com ele, pode-se calcular a variação da resistência, da capacitância e do fator de potência.

Para a resistência, de acordo com a equação 3.2, tem-se que a variação foi de:

$$\Delta R_1 = -\frac{\Delta I_a^R R_1^2}{V_a} = -\frac{0.1441 * \cos(80.69^\circ) * 4700^2}{178} = -2893 \Omega$$

Desta forma, o parâmetro  $R_1$  calculado pelo método é:

$$R'_1 = R_1 + \Delta R_1 = 4700 - 2893 = 1807 \Omega$$

Para a capacitância, de acordo com a equação 3.3, tem-se que a variação foi de:

$$\Delta C_1 = \frac{\Delta I_a^C}{\omega V_a} = \frac{0.1441 * \text{sen}(80.69^\circ)}{377 * 178} = 2.12 \mu F$$

Desta forma, o parâmetro  $C_1$  calculado pelo método é:

$$C'_1 = C_1 + \Delta C_1 = 2.2e^{-6} + 2.12e^{-6} = 4.32 \mu F$$

Para o fator de potência, de acordo com a equação 3.11, tem-se que a variação foi de:

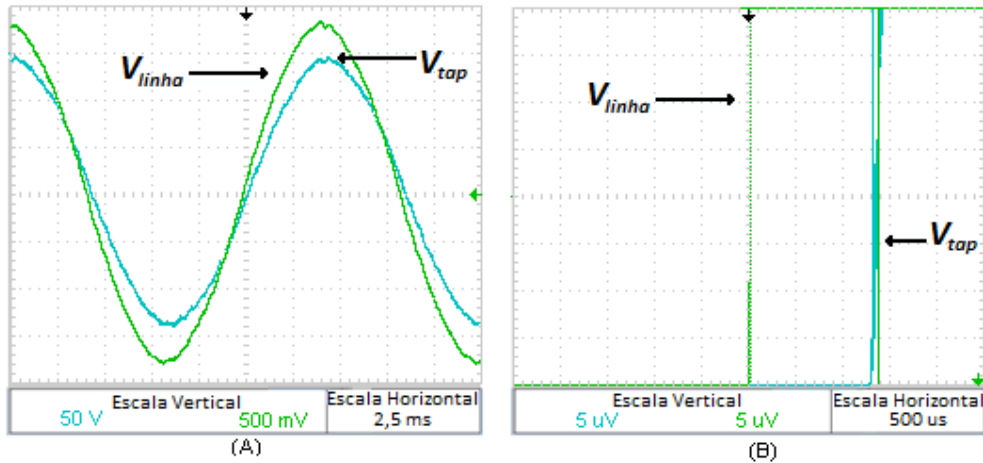
$$\Delta fp = \Delta I_a^R \frac{\omega^2 R_1^3 C_1^2}{V_a [(\omega R_1 C_1)^2 + 1]^{3/2}} = 0.143$$

Desta forma, o fator de potência calculado pelo método é:

$$fp' = fp + \Delta fp = 0,249 + 0,143 = 0,392$$

Os sinais adquiridos em osciloscópio são apresentados na figura 44.





**Figura 44 - Sinais  $V_{Linha}$ (verde) e  $V_{tap}$ (azul)**  
 (a)Escala horizontal normal (b) Escala horizontal reduzida

Como pode ser visto pela figura 42(b), através dos cursores do osciloscópio, podemos identificar o intervalo de tempo entre os sinais. Obteve-se

$$\Delta t = t_{tap} - t_{Linha} \approx -464 \mu s \quad (5.11)$$

tendo em vista a frequência de 60Hz da rede, a diferença de fase  $\Delta\delta$  entre os sinais é dada por

$$\Delta\delta = 2\pi * 60 * (-480\mu) = -0.1749 = -10.022^\circ \quad (5.12)$$

Através da expressão 3.24, se obtém o fator de potência da bucha, que é dado por

$$fp = \cos(\Delta\delta + \pi/2) = \cos(-0.1749 + 1.571) = 0.174 \quad (5.13)$$

Os cálculos da resistência e capacitância são obtidos através das equações 3.21 e 3.22, onde os valores são exibidos pelas equações 5.14 e 5.15

$$R_1 = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{m^2+1-k}{k}} = 1.79 \Omega \quad (5.14)$$

$$C_1 = \frac{m}{\omega R_1} = 8.35 \mu F \quad (5.15)$$

Os resultados obtidos com o protótipo são apresentados na tabela 6, onde está calculado também a tangente *delta*, utilizando a equação 2.5 e a discrepância referente aos valores calculados pelo sistema.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores Nominais</b>	<b>Valores Calculados</b>	<b>Discrepância (%)</b>
Resistência - $R_1$ (k $\Omega$ )	3.48	1.8	48.28
Capacitância - $C_1$ ( $\mu F$ )	4.17	4.32	3.60
Fator de Potência - $fp$	0.18	0.392	117.78
Tangente <i>Delta</i> - $\tan \delta$	0.183	0.341	86.34

**Tabela 6 - Resultados do protótipo utilizando o método somatório das correntes de fase para uma bucha degradada**

## 5.7 - Discussão

Os resultados obtidos com o sistema de medição no protótipo de bancada utilizando tanto o método de sensoriamento proposto quanto o método somatório das correntes de fase exibiram uma discrepância considerável na estimação do fator de potência, no cálculo da resistência e da tangente *delta*, conforme exibido nas tabelas 4, 5 e 6. Apenas o cálculo da capacitância obteve um resultado satisfatório.

# Capítulo 6

---

## Conclusão e Proposta de Trabalhos Futuros

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de um método de monitoramento *online* de buchas condensivas. Para efeito de validação, comparou-se resultados de simulação e de protótipo de bancada com o método somatório das correntes de fase, já difundido comercialmente.

Como visto nos resultados apresentados, observou-se que o valor dos parâmetros obtidos com os dois sistemas de medição difere dos valores nominais empregados no protótipo.

Deve-se lembrar que protótipo de bancada em 127 V<sub>RMS</sub>, de certa forma, ilustra condições diferentes das existentes em campo: tensões desequilibradas e considerável conteúdo harmônico. Têm-se ainda os capacitores que modelam a bucha, que possuem fator de qualidade finito e, portanto, resistência equivalente paralela significativa. Além disso, os resistores de potência utilizados possuem uma pequena indutância em série. Por esses motivos a resistência total paralela aparece alterada nos cálculos.

De qualquer forma, os valores calculados por avaliação dos sinais no osciloscópio são considerados referência. E conforme visto nas tabelas 4 e 5, o sistema de medição utilizando o método de sensoriamento proposto obteve valores aceitáveis de resposta em comparação com o valor calculado pelo osciloscópio.

O método de monitoramento por soma das correntes apresenta algumas características críticas. Além da incerteza causada por desbalanços de tensão, as distorções harmônicas das tensões de linha fazem com que as componentes múltiplas de 3 (mesma fase) se somem no sensor, formando corrente harmônica de sequência zero. Esta componente pode mascarar a componente fundamental de corrente, induzindo grandes erros na estimação dos parâmetros, principalmente no início da degradação da bucha.

Em relação a trabalhos futuros acerca do protótipo desenvolvido, tem-se como meta a instalação em campo, em uma subestação. Desta forma, a correta estimação dos parâmetros de uma bucha real, validaria o método proposto. Para isso, uma medição *offline* cuidadosa nos parâmetros da bucha deve ser realizada antes que o método entre em operação. Para que então se tenha uma correta comparação.

Acerca de divulgações tecnocientíficas, este projeto já publicou 2 artigos [5, 6] para congressos de engenharia elétrica.

## Referências Bibliográficas

- [1] Berler, Z.; Sokolov, V.; Prikhodko, V.; Bates, D.; , "On-line monitoring of HV bushings and current transformers," *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings* , vol., no., pp.61-66, 26-26 Oct. 2005.
- [2] Setayeshmehr, A.; Akbari, A.; Borsi, H.; Gockenbach, E.; , "A novel method to on-line measuring of power factor ( $\tan \delta$ ) and capacitance of transformers' bushings," *Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp. 289- 292, 26 June-1 July 2005.
- [3] Lachman, M.F.; Walter, W.; von Guggenberg, P.A.; , "On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.15, no.1, pp.155-162, Jan 2000.
- [4] Alves, M.; Melo, M.; , "Experiência com Monitoração On-line de Capacitância e Tangente *Delta* de Buchas Condensivas", Proceedings of the XIX SNPTEE, Outubro/2007.
- [5] Neto, J. L.; Botelho, M. P. G.; Cuffa, H.; Lima, A. C. S.; Carvalho, C. C.; Werneck, M. M.; Rosa Filho, R. N.; , "Comparação em protótipos de dois Sistemas de Monitoramento em Tempo Real de Buchas Condensivas de Transformador". Proceedings of the XXI SNPTEE 2011, por aparecer.
- [6] Botelho, M. P. G.; Cuffa, H.; Neto, J. L.; Lima, A. C. S.; Carvalho, C. C.; Werneck, M. M.; Rosa Filho, R. N.; , "Sistema de Monitoramento de Buchas Condensivas de 500kV". Proceedings of the 9º CLAGTEE 2011, por aparecer.
- [7] Sokolov, V. V.; Vdoviko, V. P.; , "On-line Monitoring System for High-Voltage Transformer and Bushing Insulation".
- [8] Mark, B.; Goff, P. E. "Substation Equipments (Bushings)".
- [9] Silva, L. N. A.; , "*Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão*".

[10] Kindermann, Geraldo.; , "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", Vol. 1, 1999.

[11] Setayeshmehr, A.; Akbari, A.; Borsi, H.; Gockenbach, E.; , "On-line monitoring and diagnoses of power transformer bushings," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , vol.13, no.3, pp.608-615, June 2006.

[12] Ghartemani, M. K., Rogers, E. S., "A New Phase-Locked Loop (PLL) System". Circuits and Systems, 2001. MWSCAS 2001. Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium.

[13] Ghartemani, M. K., Iravani, M. R., "Robust and Frequency-Adaptive Measurement of Peak Value" *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 19, no. 2, April 2004.